



Diseño hardware de un módulo de comunicaciones unidireccional entre bicicletas y vehículos basado en C-V2X,

Alejandro Torres Ortega

Tutor: Marta Cabedo Fabres

Tutor de empresa: Carlos Sánchez Bou

Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster en Ingeniería Telecomunicación

Curso 2019-20

Valencia, 8 de septiembre de 2020



Resumen

En el siguiente trabajo se presenta el diseño electrónico de un dispositivo de comunicación entre bicicletas y vehículos con el fin de evitar atropellos y todo tipo de posibles accidentes. Este dispositivo de tipo *Prove of Concept* está basado en un módulo de comunicaciones, un módulo para cargar baterías y el diseño de una antena impresa a la frecuencia de 5.9 GHz. Todos estos módulos se integran en una misma PCB y forman el prototipo final.

El módulo de comunicaciones estará constituido por un microcontrolador que será el encargado de gestionar toda la información a transmitir para evitar accidentes. Esta información se transmitirá a la frecuencia de 5.9 GHz, que se trata de la frecuencia elegida para implementar el standard *Car2Car*, en el cuál se ha basado el diseño del prototipo y en consecuencia, la antena impresa. Además del microcontrolador, se ha de implementar un filtro SAW para el conexionado de la antena, una memoria para almacenar datos, y un *transceiver* para garantizar la comunicación entre extremos. Es decir, entre la bicicleta mediante la antena a diseñar y la antena del vehículo. Por último, se le añadirá una antena GPS para poder transmitir la posición de la bicicleta a tiempo real y de esta manera los conductores de los vehículos cercanos podrán tener constancia de la proximidad de la bicicleta.

Respecto al módulo para cargar baterías, dependerá de la alimentación del módulo anterior para poder seleccionar la batería. Más adelante se explicará en profundidad, ya que se deberá seleccionar el número de celdas de la batería dependiendo del voltaje de alimentación del dispositivo, y de la capacidad de la batería, lo que marcará la autonomía del equipo. Para ello, se ha decidido que sea un producto recargable, por lo que un microcontrolador adicional será necesario para poder gestionar la corriente de carga de las baterías. Además, este microcontrolador será un componente con un firmware programado, en el cuál podamos modificar los valores que más se adecuen a nuestra aplicación.

La última tarea relevante se trata del diseño y simulación de la antena a usar en el dispositivo, para ello se evaluarán distintas soluciones contemplando distintos tipos de antenas. Para la antena de GPS se utilizará una antena comercial, ya que es una antena muy recurrente en el mercado, y realizar un diseño de esta antena engrandecería la PCB que se va a diseñar, por lo que el tamaño es una restricción en el diseño.

Para finalizar este punto, se ha de comentar que en este trabajo se documentarán las tareas de selección de componentes, creación de esquemáticos para realizar todas las conexiones y la creación del *layout* del circuito impreso. De esta manera se podrían generar los archivos de fabricación correspondientes y enviar el prototipo a fabricar.



Resum

En el següent escrit es presentarà el disseny electrònic d'una idea de comunicació entre bicicletes i vehicles per tal d'evitar atropellaments i tot tipus de possibles accidents. Aquest *Prove of Concept* està basat en un mòdul de comunicacions, un mòdul per carregar bateries i el disseny d'una antena impresa a la freqüència de 5.9 GHz, tots aquests mòduls s'integraran en una mateixa PCB i formaran el prototip final.

El mòdul de comunicacions estarà constituït per un microcontrolador que serà l'encarregat de gestionar tota la informació a transmetre per evitar accidents. Està informació s'ha de transmetre a la freqüència de 5.9 GHz que es tracta de la freqüència escollida per implementar l'estàndard *Car 2 Car*, en el quin s'ha basat el disseny de l'prototip i en conseqüència l'antena impresa. A més de l'microcontrolador, s'ha d'implementar un filtre SAW per la connexió de l'antena, una memòria per guardar dades, i un *transceiver* per garantir la comunicació entre extrems. És a dir, entre la bicicleta mitjançant l'antena a dissenyar i l'antena del vehicle. Finalment, se li afegirà una antena GPS per poder transmetre la posició de la bicicleta a temps real i d'aquesta manera els conductors dels vehicles propers podran tenir constància de la proximitat de la bicicleta.

Pel que fa a l'mòdul per carregar bateries, dependrà de l'alimentació del mòdul anterior per poder seleccionar la bateria, més endavant s'explicarà en profunditat, ja que s'hauran de seleccionar el nombre de cel·les de la bateria depenent de l'voltatge d'alimentació del dispositiu, i de la capacitat de la bateria el que marcarà l'autonomia del dispositiu. Per això s'ha decidit que fora un producte carregable, per això un microcontrolador addicional serà necessari per poder gestionar la corrent de càrrega de les bateries, a més aquest microcontrolador serà un component amb un firmware programat, a on podrem modificar els valors que més s'adeqüin a la nostra aplicació.

L'última tasca rellevant es tracta del disseny i simulació de l'antena a utilitzar en el dispositiu, per això s'avaluaran diferents solucions contemplant diferents tipus d'antenes. Per l'antena de GPS s'utilitzarà una antena comercial, ja que és una antena molt recurrent en el mercat, i realitzar un disseny d'aquesta antena feria més gran la PCB que es va a dissenyar, de manera que el tan gran és una restricció en el disseny.

Per finalitzar aquest punt, s'ha de comentar que en aquest escrit es documentaran les tasques de selecció de components, creació d'esquemàtics per realitzar totes les connexions i la creació del layout del circuit imprès. D'aquesta manera es podrien generar els arxius de fabricació corresponents i enviar el prototip a fabricar.

Abstract

In the following writing, the electronic design of a communication idea between bicycles and vehicles will be presented in order to avoid collisions and all kinds of possible accidents. This Prove of Concept is based on a communications module, a module to charge batteries and the design of a printed antenna at the frequency of 5.9 GHz, all these modules will be integrated on the same PCB and will form the final prototype.

The communications module will be made up of a microcontroller that will be in charge of managing all the information to be transmitted to avoid accidents. This information will be transmitted at the 5.9 GHz frequency, which is the frequency chosen to implement the Car 2 Car standard, on which the design of the prototype has been based and, consequently, the printed antenna. In addition to the microcontroller, a SAW filter must be implemented to connect the antenna, a memory to store data, and a transceiver to guarantee communication between the ends. That is, between the bicycle by means of the antenna to be designed and the antenna of the vehicle. Finally, a GPS antenna will be added to be able to transmit the position of the bicycle in real time and in this way the drivers of the nearby vehicles can be aware of the proximity of the bicycle.

Regarding the module to charge batteries, it will depend on the power of the previous module to be able to select the battery, later it will be explained in depth, since the number of cells of the battery must be selected depending on the supply voltage of the device, and on the battery capacity which will mark the autonomy of the equipment. For this, it has been decided that it is a rechargeable product, so an additional microcontroller will be necessary to manage the charge current of the batteries, in addition, this microcontroller will be a component with programmed firmware, in which we can modify the values that more suited to our application.

The last relevant task is the design and simulation of the antenna to be used in the device, for which different solutions will be evaluated, considering different types of antennas. A commercial antenna will be used for the GPS antenna, since it is a very recurring antenna in the market and making a design of this antenna would enlarge the PCB to be designed, so the size is a restriction in the design.

To end this point, it should be noted that this document will document the tasks of selecting components, creating schematics to make all the connections, and creating the layout of the printed circuit. In this way, the corresponding manufacturing files could be generated and the prototype to be manufactured could be sent.



Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	5
1.1	Motivación.....	5
1.2	Objetivo	5
1.3	Estructura de la memoria.....	6
Capítulo 2.	Estado del arte.....	7
2.1	Car 2 Car.....	7
2.2	Seguridad para bicicletas.....	10
Capítulo 3.	Metodología del proyecto.....	12
Capítulo 4.	Selección de componentes críticos.....	15
4.1	Microcontrolador.....	15
4.1.1	Criterios de selección del microcontrolador.....	15
4.2	Cargador de baterías.....	19
4.2.1	Selección de la batería.....	19
4.2.2	Selección del módulo de carga.....	22
4.2.3	BQ40z60	24
Capítulo 5.	Diseño de esquemáticos.....	31
5.1	USB TIPO C.....	31
5.2	Alimentación del circuito	32
5.2.1	Controlador del botón	34
5.2.2	Alimentación de 5V	36
5.2.3	Alimentación de 3.3V	37
5.3	Cargador de baterías.....	38
5.4	LEDs del sistema.....	45
5.5	Microcontrolador.....	47
5.6	Integración de las antenas.....	48
Capítulo 6.	Diseño y simulación de antena de comunicaciones.....	50
6.1	Estudio de las posibles soluciones.....	50
6.1.1	Monopolo	52
6.1.2	Inverted L Antenna	53
6.1.3	Inverted F Antenna.....	53
6.1.4	Printed Inverted F Antenna	54
6.1.5	Patch Antenna	54



6.2	Simulación de las antenas propuestas.....	55
6.2.1	Monopolo	55
6.2.2	Inverted F Antenna.....	58
6.2.3	Printed Inverted F Antenna	60
6.2.4	Patch Antenna	63
6.3	Selección de antena final.	66
6.3.1	Influencia del plástico en la antena IFA.....	67
6.3.2	Influencia del plástico en la antena PIFA.....	69
6.3.3	Selección de antena final.....	71
6.4	Antena GPS	71
Capítulo 7.	Diseño de circuito impreso.	74
Capítulo 8.	Pliego de condiciones.	84
8.1	Bill of Materials.....	84
8.2	Planos de assembly.....	88
8.3	Información complementaria.....	90
Capítulo 9.	Conclusiones y líneas futuras.	92
Bibliografía	93



Índice de tablas.

Tabla 1. Comparación entre microcontroladores.....	18
Tabla 2. Comparación entre cargadores comerciales.....	24
Tabla 3. Parámetros de diseño en tensión del cargador.....	28
Tabla 4. Parámetros de diseño en corriente del cargador.....	29
Tabla 5. Comparación entre antenas.....	66
Tabla 6. Comparación entre antenas con carcasa.....	71
Tabla 7. Especificaciones antena GPS.....	72
Tabla 8. Bill of Materials.....	87



Glosario

IoT	Internet of Things
CV-X	Cellular Vehicle to everything
GPS	Global Positioning System
BoM	Bill of Materials
DSRC	Dedicated Short Range Communications
LTE	Long Term Evolution
RAM	Random Access Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
USB	Universal Serial Bus
CAN	Controller Area Network
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
I2C	Inter Integrated Circuit
SMB	System Management Bus
MCU	Microcontroller Unit
PCB	Printed Circuit Board
SMD	Surface Mount Device
JTAG	Joint Test Action Group
SRAM	Static RAM
DDR	Double Data Rate RAM
BGA	Ball Grid Array
PTH	Plated Through Hole
GSM	Global System Mobile
GPIO	General Purpose Inputs/Outputs
MIMO	Multiple Input Multiple Output
PWM	Pulse Width Modulation



Capítulo 1. Introducción.

1.1 Motivación

Con el paso del tiempo, las tecnologías en el sector de las comunicaciones han avanzado a un ritmo vertiginoso, dando lugar a conceptos como el de *Smart City* dentro del popular género IoT (*Internet of Things*). Este tipo de avance está relacionado con mejorar la vida de las personas, haciendo posible obtener información y el control sobre todo tipo de datos personales.

En un intento de mejora de la vida cotidiana, nace la motivación de diseñar un módulo de comunicaciones entre bicicletas y vehículos con el fin de evitar accidentes. Esta idea surge debido al amor de mi padre a la *mountain bike* y el continuo temor de mi madre a un accidente de tráfico. Por lo que gracias a las tecnologías actuales y venideras (nuevos estándares de comunicación), se desarrollará el diseño de dicho módulo de comunicaciones durante este documento, entrando en el diseño electrónico y el diseño de su circuito impreso, así como el diseño de la antena de comunicaciones a la frecuencia de 5.9 GHz. Esta frecuencia tan peculiar, es la empleada en el estándar *Car 2 Car* o CV-X, en el que se basa la comunicación entre vehículos que muchas grandes empresas automovilísticas están llevando a cabo en sus nuevos productos.

1.2 Objetivo

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el diseño completo de un módulo de comunicaciones unidireccional entre bicicletas y vehículos. La función de dicho módulo será transmitir en la banda de frecuencia de 5.9 GHz, la posición de la bicicleta para generar así una alerta en la centralita electrónica del vehículo y prevenir un accidente. El módulo contará con una antena de transmisión diseñada con el *software* electromagnético CST Microwave Studio, y una antena GPS comercial, que no ha sido necesario diseñar debido a la gran cantidad de este tipo de antenas disponibles en el mercado. Además, el dispositivo contará con un microcontrolador encargado de procesar y transmitir la información del posicionamiento de la bicicleta.

Por último, se ha decidido que el dispositivo sea portátil por lo que se le ha añadido un cargador de baterías integrado para reutilizar la batería y no tener que reemplazarla.

A lo largo de esta memoria, se describirá la tarea de creación de esquemáticos, donde se englobará toda la electrónica y el conexionado con las antenas, el diseño de la antena y el *layout* final para poder fabricar el módulo, diseñado con el *software* de diseño electrónico Altium Designer. Además, se extraerán los ficheros de fabricación, de manera que, si en un futuro se quisiera fabricar el prototipo, únicamente habría que hacer uso de estos ficheros. Dentro de estos ficheros aparecen archivos tipo *Bill of Materials*, *Assembly Drawings*, *Gerbers Files*, *Pick and Place Files*, *Drills*, *Manufacturing Notes*.



1.3 Estructura de la memoria

Dentro de la memoria podemos distinguir la siguiente estructura:

- Capítulo 1. Introducción. Dónde se realizará una breve introducción del contexto y la motivación del proyecto, y se explicará el objetivo del proyecto y su estructura.
- Capítulo 2. Estado del arte. En este apartado se contextualizará el proyecto.
- Capítulo 3. Metodología del proyecto. Dónde se dividirán y detallarán las tareas del proyecto y su duración. Se explicará mediante un diagrama de Gantt.
- Capítulo 4. Selección de componentes. Apartado en el que se justificará la selección de cada componente crítico, estudiando diferentes alternativas en el mercado actual.
- Capítulo 5. Creación de esquemáticos. Capítulo en el que se definirá el esquema de conexiones de todo el dispositivo y se detallarán componentes no vistos en el capítulo anterior.
- Capítulo 6. Diseño de antena a 5.9 GHz. En este apartado se verán los diferentes tipos de antena, comparando y justificando la selección de nuestro diseño.
- Capítulo 7. Diseño de *Layout*. Para finalizar con la etapa de diseño, se realizará el *layout* de la PCB, dejándola así preparada para su fabricación.
- Capítulo 8. Pliego de condiciones. Dónde se expondrán la información necesaria para la fabricación.
- Capítulo 9. Líneas futuras. Concluyendo la memoria se relatarán sus posibles mejoras y funcionalidades en el futuro.

Capítulo 2. Estado del arte.

2.1 Car 2 Car

Antes de entrar a analizar dispositivos existentes, similares al diseño propuesto, cabe contextualizar de que se trata el estándar *Car2Car* [1].

El *Car2Car* o *Vehicle2Vehicle*, es un estándar de comunicación inalámbrica entre vehículos donde se intercambian informaciones, para poder garantizar un tráfico seguro sin accidentes. Este estándar utiliza la frecuencia de 5.9 GHz para realizar el intercambio de datos, por lo que como se ha hablado antes, nuestro diseño estará diseñado para dicha frecuencia.

Según se puede extraer de la página web del *Car2Car Communication Consortium* [1], que es la organización encargada de gestionar este standard, cuyo objetivo es garantizar que el tráfico sea seguro y eficiente mediante la transmisión de la información necesaria para dicho fin. Para ello, la idea fundamental del estándar es la comunicación entre los vehículos circulantes.

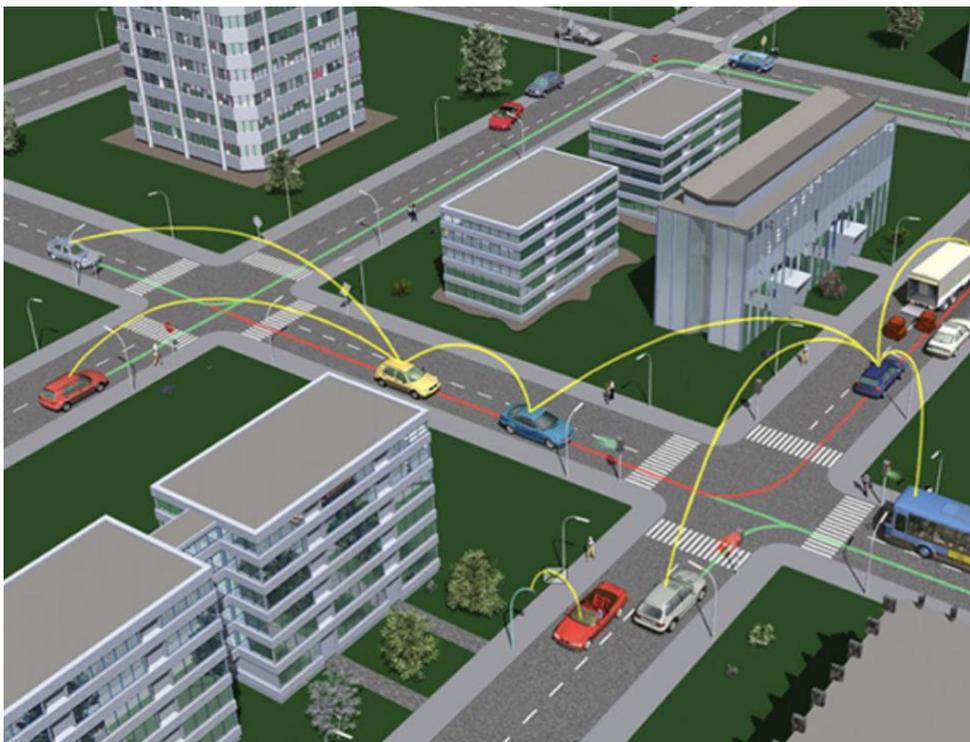


Figura 1. Concepto de Car 2 Car. [1]

Como ya se ha comentado anteriormente, para realizar la comunicación entre vehículos y transmitir los datos, se eligió la frecuencia de 5.9 GHz. Por lo que se tiende a asociar el estándar *Car2Car* con el Wi-Fi operando a 5.8 GHz, dada la proximidad de sus bandas de trabajo.

Este tipo de comunicación usa tecnología para comunicación de corto alcance (DSRC) y los datos más comunes que se suelen transmitir son la velocidad, la localización y la dirección del

desplazamiento, además de las informaciones de accidentes. El mayor inconveniente de este tipo de comunicación es el impacto de las estructuras de su entorno, edificios o vegetación, lo que limita el rango de comunicación hasta 300 metros de alcance.

Por este motivo, aparecen variaciones del estándar inicial para mejorar la transmisión de los datos y garantizar una mayor seguridad [2].

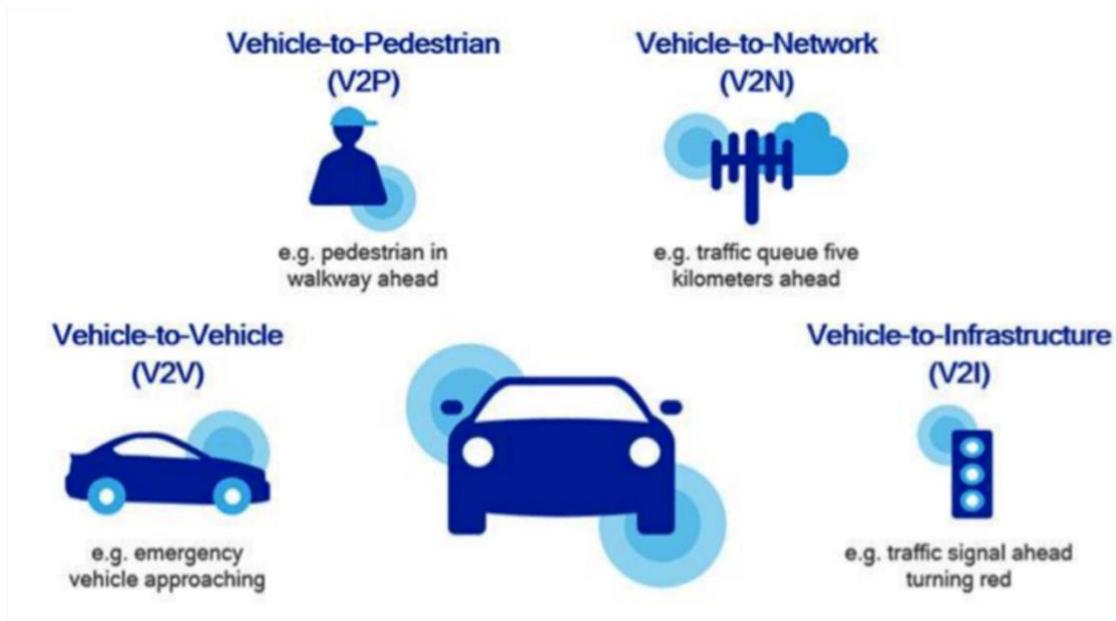


Figura 2. Comunicación V2X. [2]

Como se puede ver en la imagen anterior, aparecen comunicaciones entre el vehículo y el peatón, entre el vehículo y la red, y entre el vehículo y la infraestructura. De esta manera, empresas como Siemens, han basado su concepto de *Smart City* [3] en este estándar, desarrollando de esta manera su producto propio para garantizar la seguridad.

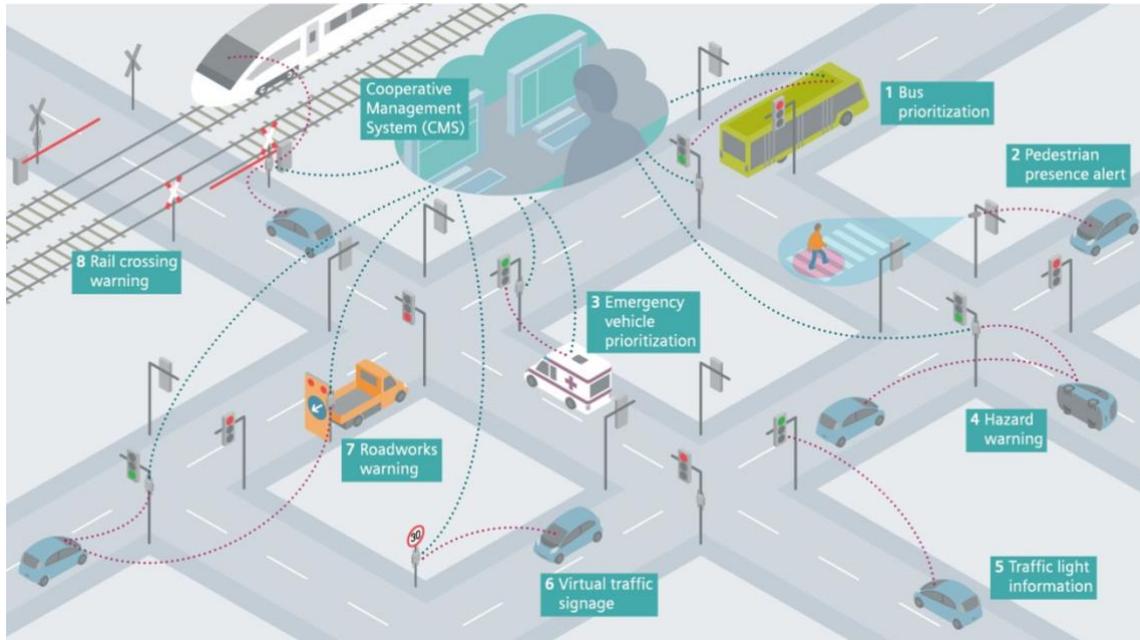


Figura 3. Concepto de *Smart City* de Siemens. [3]

Como se puede ver en la imagen anterior, el conexionado en la *Smart City* es total, y todos los usuarios tienen disponibles las informaciones sobre el entorno para evitar accidentes. Esto se puede llevar a cabo mediante el dispositivo *Sitraffic ESCoS RSU* [3] de Siemens.



Figura 4. *Sitraffic ESCoS RSU*. [3]

Este dispositivo está diseñado para operar en la banda de Wi-Fi operando bajo el estándar IEEE 802.11p [4] y en la banda del LTE-V2X, y se basa en un dispositivo central que se encarga de gestionar los datos, y muchos dispositivos para garantizar un mayor rango de cobertura. Por lo tanto, se trata de un sistema de balizas lo cuál resulta excesivamente costoso.

Al igual que en el género en el que se puede englobar esta tecnología, el del *Internet of Things*, está en continuo desarrollo, y empresas como Samsung ya han presentado sus primeros prototipos basados en este tipo de tecnología. Empresas de fabricación de componentes como NXP en colaboración con Autotalks, y la empresa Quectel, ya cuentan con microcontroladores diseñados para cumplir con la funcionalidad que requiere IoT.

2.2 Seguridad para bicicletas

Realizando una búsqueda en el mercado, sobre las distintas opciones que existen actualmente para poder proteger la integridad de un ciclista frente a un accidente, se puede apreciar que casi todas las soluciones son muy similares, y en mi opinión insuficientes.

En este apartado se hablará de las dos opciones más interesantes que se han encontrado sobre dispositivos de protección para bicicletas.

La primera opción se trata de *BikeSphere* [5] de la gama de productos *Trendy Drivers* de Michelin. Se trata de un dispositivo que se ubica en el sillín de la bicicleta y emite un haz de luz rojo. Dicho haz de luz, señala la distancia de seguridad que hay que tener respecto a la bicicleta, y en caso de aproximarse un vehículo, se crea un segundo círculo de mayor intensidad a modo de alarma.



Figura 5. *BikeSphere* de Michelin [5]

El mayor inconveniente de esta solución, bajo mi punto de vista, es que se trata de una alerta visual para el conductor del automóvil, que puede no llegar a ser suficiente dependiendo del momento del día, ya que la luz del haz puede no verse por la mañana.

La segunda opción se trata del sensor de proximidad *Backtracker* [6] de Garmin. Se trata de un sensor basado en 2 módulos: una luz trasera en el sillín que se encarga de avisar al vehículo de que está muy cerca del ciclista, y un segundo módulo que se coloca en el manillar y avisa al ciclista de que el vehículo está muy cerca.



Figura 6. *Backtracker* de GARMIN. [6]

Al igual que la solución anterior, su mayor inconveniente es que se trata de que una alarma visual, y puede no ser suficiente para evitar un accidente. Además, el dispositivo delante añade una variante peligrosa, ya que puede poner nervioso al ciclista al ver una alarma de posible accidente.

Por los motivos anteriores se ha descartado el diseño de una alarma mediante haz de luces, y se ha optado por el diseño de un módulo de comunicaciones, donde el receptor de la información sea el vehículo, ya que es el encargado de evitar el atropello, y en el que no sea necesario el contacto visual con la bicicleta para advertir su presencia. Para ello se utilizará un microcontrolador, de un fabricante que cuente con microcontroladores diseñados para el *Car2Car*, y una antena diseñada para la frecuencia de 5.9 GHz. Todo esto se describirá en profundidad en los siguientes capítulos.



Capítulo 3. Metodología del proyecto

La metodología y gestión de este Trabajo de Fin de Máster ha ido variando en función de las situaciones personales del autor del proyecto, debido a su compaginación con otros proyectos llevados a cabo dentro de la empresa. Debido a estos factores, lo que se muestra a continuación es una aproximación del desarrollo temporal del proyecto, pudiendo haber desplazamientos temporales de tareas no contemplados en este escrito, como períodos de mayor carga de trabajo, viajes de empresa...

Para empezar a mostrar como se han dividido las horas de trabajo del alumno para el desarrollo del proyecto, hay que destacar las tareas identificadas.

Desde un principio, se decidió tomar dos caminos, un camino de diseño de la antena de comunicación y otro camino de diseño de la electrónica que acompañaría a dicha antena. Por lo que se pueden identificar un grupo de tareas llamado **Diseño de la antena**, y otro grupo llamado **Diseño electrónico**. Además, se identificaron otros grupos de tareas llamados **Estudio de mercado**, **Documentación de fabricación** y **Redacción de la memoria**.

Dentro de los grupos, aparecen distintas subtareas, que se muestran en la siguiente imagen, acompañadas de su duración.



▣	- Estudio de mercado	18/11/19	18/12/19	23d	
▣	Estudio de opciones a la venta	18/11/19	04/12/19	13d	
▣	Estudio de standards	05/12/19	18/12/19	10d	3
▣	- Diseño de la antena	05/12/19	10/02/20	48d	
▣	Definición de la ubicación	05/12/19	05/12/19	1d	3
▣	Estudio de posibles antenas en el mercado	06/12/19	19/12/19	10d	6
▣	Estudio de los posibles diseños	20/12/19	26/12/19	5d	7
▣	Simulación de antenas	27/12/19	06/02/20	30d	8
▣	Comparación de resultados	07/02/20	07/02/20	1d	9
▣	Selección de antena	10/02/20	10/02/20	1d	10
▣	- Diseño electrónico	27/12/19	03/04/20	71d	
▣	Selección de microcontrolador	27/12/19	30/12/19	2d	8
▣	Selección de batería	27/12/19	02/01/20	5d	8
▣	Selección de cargador de baterías	03/01/20	09/01/20	5d	14
▣	Diseño de esquemáticos	10/01/20	20/02/20	30d	15
▣	Selección de componentes	10/01/20	20/01/20	7d	15
▣	Integración de la antena en el esquemático	21/02/20	21/02/20	1d	16
▣	Placement de componentes en el layout	24/02/20	28/02/20	5d	18
▣	Enrutado del layout	02/03/20	20/03/20	15d	19
▣	Revisión del layout	23/03/20	23/03/20	1d	20
▣	Documentación de fabricación	24/03/20	31/03/20	6d	
▣	Gerbers	24/03/20	24/03/20	1d	21
▣	Bill of Materials	25/03/20	25/03/20	1d	23
▣	Planos de ensamblaje	26/03/20	26/03/20	1d	24
▣	Planos de fabricación	27/03/20	27/03/20	1d	25
▣	Revisión de la documentación	30/03/20	31/03/20	2d	26
▣	Redacción de la memoria	24/02/20	03/04/20	30d	

Figura 6. Tareas del proyecto.

Tras conocer el nombre de las tareas anteriores y sus duraciones, cabe destacar la aproximación en forma de Diagrama de Gantt, donde se puede apreciar el trascurso del desarrollo del proyecto.

Como se ha comentado con anterioridad, se trata de una aproximación, y en la realidad puede haber cambios de calendario por motivos ajenos.

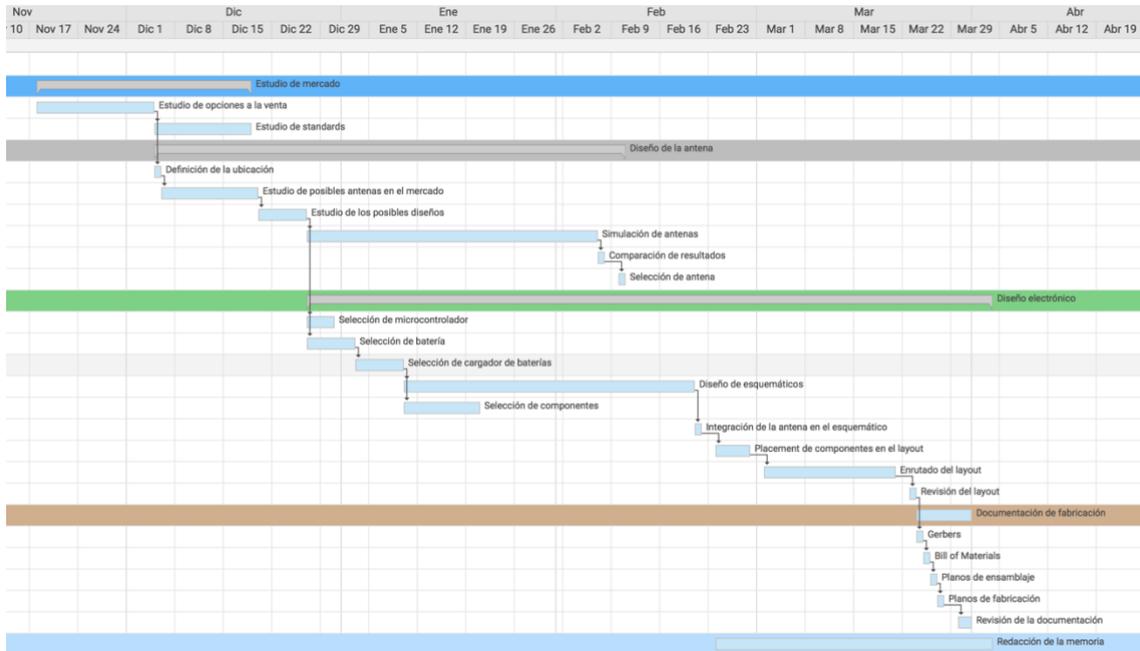


Figura 7. Diagrama de tiempos del proyecto.



Capítulo 4. Selección de componentes críticos.

Una vez visto el estado del arte del proyecto, la actual visión de diseño que hay respecto a la comunicación *Car 2 Car*, y vista la metodología del proyecto, el siguiente paso es la selección de componentes críticos. En este apartado se profundizará en los componentes más importantes del diseño y en la justificación de su elección, valorando alternativas.

4.1 Microcontrolador

Sin duda, el microcontrolador es el corazón de todos los productos electrónicos, ya que es el encargado de procesar todos los datos, gestionar las comunicaciones entre componentes y gobernar todos los periféricos, por lo que su selección puede resultar crítica.

Los criterios de selección de un microcontrolador dependen mucho de su aplicación, ya que influyen las siguientes características:

- Memoria: Memorias Flash, RAM o EEPROM son los tipos de memorias que encontramos integradas en estos componentes. Si se trata de un problema de memoria, se podría utilizar una memoria externa.
- GPIO: Las entradas y salidas analógicas.
- Comunicación Serie: Dependiendo del protocolo de comunicación serie que queramos utilizar. UART/USART, I2C, SPI, USB o CAN.

Con las prestaciones anteriormente comentadas, los microcontroladores más habituales en proyectos electrónicos son el 8051 de Intel, el PIC de Microchip, el AVR de Atmel y los ARM Cortex – M, que forman parte de la mayoría de los microcontroladores comerciales, como los del fabricante STMicroelectronics.

Para este proyecto se seleccionará un microcontrolador de la familia ARM Cortex – M ya que se trata de un componente de montaje superficial (SMD) y su encapsulado nos ahorrará espacio en el circuito impreso, mientras que los demás son componentes PTH, que requieren perforar la PCB para ser insertados y suelen ser microcontroladores más complejos.

4.1.1 Criterios de selección del microcontrolador

Para seleccionar un microcontrolador, se ha de ser muy consciente de su aplicación, ya que este conocimiento nos puede ayudar a elegir al candidato indicado. Un mal conocimiento puede ocasionar una falta de memoria, de número de entradas analógicas, incluso una falta de espacio en nuestro circuito impreso.

Por lo que antes de elegir el microcontrolador, se deberá tener en cuenta las necesidades de la aplicación y así saber el tipo de comunicación y número de entradas que necesitamos. A continuación, se puede observar un diagrama de bloques de la aplicación del microcontrolador para el objetivo de este proyecto

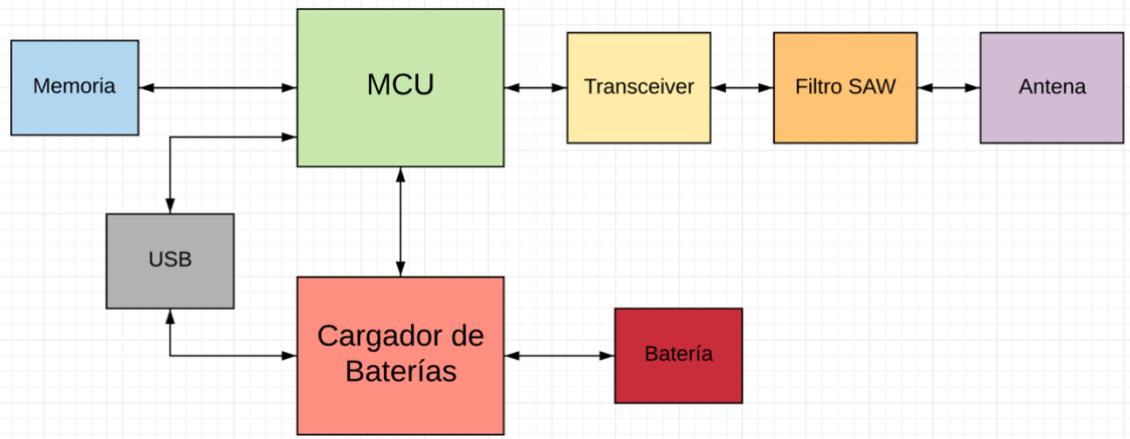


Figura 8. Diagrama de bloques de la aplicación.

Una vez se tienen claras las entradas que se necesitan, es hora de elegir el microcontrolador. Por experiencia laboral, uno de los microcontroladores más versátiles se trata del STM32F103CBT7 [7] del fabricante STMicroelectronics. Se trata de un microcontrolador de la familia ARM Cortex – M3 con más de 9 interfaces de comunicaciones (I2C, USART, SPI, CAN, USB), con una memoria Flash de 128 Kbytes y una memoria SRAM de 20 Kbytes. La vía de programación se puede hacer mediante JTAG o SWD. Este microcontrolador se puede obtener en varios encapsulados, del cuál destacaría el LQFP48 por su tamaño y facilidad de trazar pistas durante el *layout* frente al BGA64, que es más pequeño pero el *fanout* de este tipo de encapsulado y su proceso de soldadura son más críticos. Este microcontrolador es un candidato para el diseño avalado por mi experiencia laboral en la empresa Celestica, además de su uso en gran cantidad de proyectos industriales. El hecho de que brinde la posibilidad de establecer una comunicación CAN, que se trata de la comunicación más usual en el sector industrial y automovilístico, hace que sea una de las opciones más comunes. A continuación, se puede ver su diagrama de bloques:

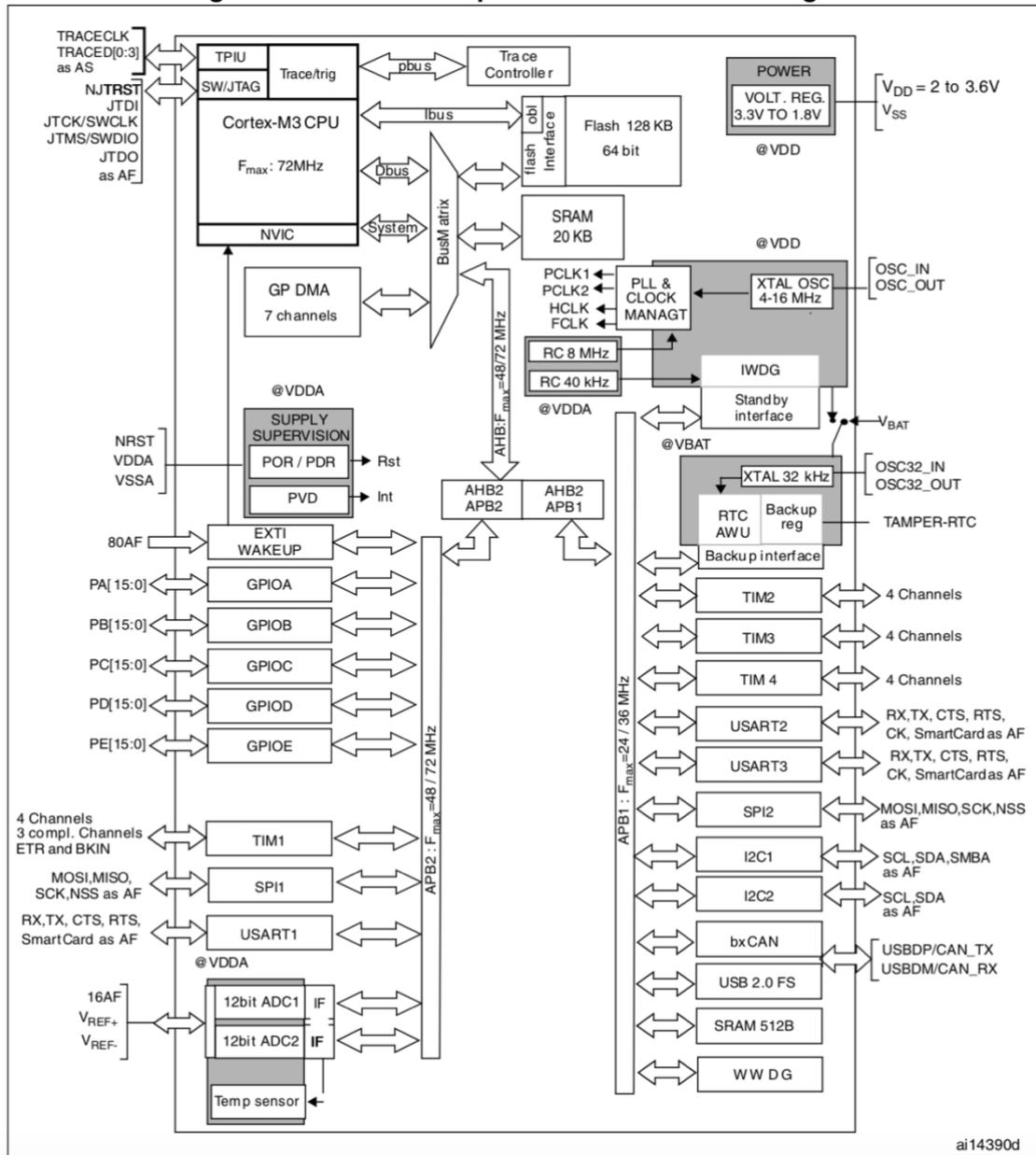


Figura 9. Diagrama de bloques del microcontrolador STM32F103CBT7 [7].

En la búsqueda de un dispositivo alternativo que mejorase las prestaciones del microcontrolador del fabricante STMicroelectronics, se descubrió que la empresa Ford estaba implementando aplicaciones LTE-V2X y tras indagar en sus diseños, se encontró que la empresa Quectel había desarrollado un módulo de comunicaciones destinado exclusivamente a la comunicación LTE-V2X, el AG15 [8]. Este módulo incorpora un microcontrolador ARM Cortex-A7 además de funcionalidades C-V2X en la banda de frecuencia que se buscaba. Al igual que el microchip de STMicroelectronics, este se comunica por SPI, I2C, PCIe, UART, además de tener pines dedicados a la comunicación GPS para nuestra futura antena, como características destacables. A diferencia del microcontrolador anterior, el AG15 no garantiza una comunicación CAN, por lo

que nos deja entrever que se trata de un microcontrolador totalmente destinado a la comunicación V2X. A continuación, se puede ver su diagrama de bloques:

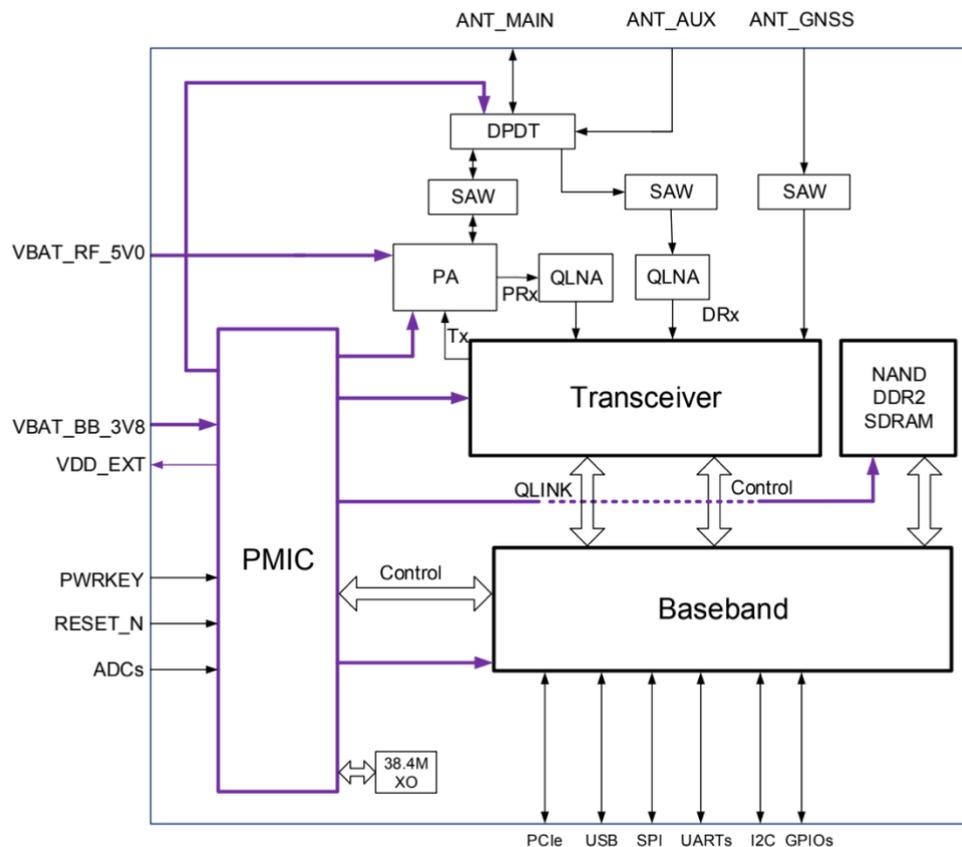


Figura 10. Diagrama de bloques del microcontrolador AG15 [8].

Una vez somos conscientes de las características de ambos microcontroladores, se ha dibujado una tabla comparativa de sus ventajas e inconvenientes, con el fin de cerrar la selección del microcontrolador.

Característica	STM32F103CBT7	AG15
Tamaño	7 x 7 mm	32 x 28 mm
Soldadura	PAD	BGA
Transceiver	Externo	Embebido

Filtro SAW	Externo	Embebido
Memoria	Externo	Embebido

Tabla 1. Comparación entre microcontroladores.

Viendo la tabla anterior, se puede apreciar que el microcontrolador STM32F103CBT7 se trata de un componente mucho más pequeño en tamaño y más sencillo de soldar respecto del AG15, ya que emplea encapsulado tipo BGA.

En contraposición, se puede apreciar que el microcontrolador AG15 posee embebido una memoria suficiente para la aplicación, mientras que el STM32F103CBT7 necesitaría de un componente extra como podría ser una FRAM, una NAND o una SDRAM. Además, al igual que la memoria, el AG15 posee un filtro SAW y un *transceiver* embebidos, por lo que no necesitaríamos de estos componentes. Con el STM32F103CBT7 si que se necesitarían ya que la topología usual de una antena y un microcontrolador es la siguiente:



Figura 11. Diagrama de bloques de conexión entre el MCU y la Antena.

Realizando una búsqueda en los principales distribuidores de componentes, sobre un filtro SAW y un *transceiver* que funcionaran a la frecuencia de 5.9 GHz, nos dimos cuenta de que apenas hay componentes diseñados para esta frecuencia, por lo que es el mayor hándicap para el microcontrolador STM32F103CBT7. De esta forma, el microcontrolador a usar es el AG15, por la cantidad de ventajas que presenta.

4.2 Cargador de baterías.

Continuando con la selección de componentes, en este apartado se verán los componentes críticos para diseñar un cargador de baterías. En primer lugar, se ha de determinar la batería que va a ser la alimentación del dispositivo, y en función de la batería seleccionada, se seleccionará el circuito integrado adecuado para el cargador de baterías del dispositivo.

4.2.1 Selección de la batería.

Para seleccionar la batería, se ha de decidir el tipo de batería a emplear, para ello se ha de detallar los tipos de baterías que puedan ser candidatas para la aplicación.



Se define una batería, como un dispositivo formado por una o varias celdas electroquímicas. Dichas baterías transforman la energía química que acumula en sus celdas en electricidad. La única diferencia entre una batería y una pila es que las características electroquímicas de las baterías hacen que estas se puedan recargar, mientras que las pilas no.

Las principales características de las baterías son las siguientes:

- Tensión nominal (V). Se trata de la tensión que va a entregar a la aplicación.
- Capacidad de carga (Ah). También conocido como la autonomía de la batería, el tiempo dependerá del consumo de la aplicación final.
- Energía (Wh). Es el producto de la tensión por la corriente entregada.
- Factor de auto descarga. Se trata del factor que determina como se deteriorará la batería con el tiempo.
- Efecto memoria. Se trata de un efecto que provoca el deterioro de las baterías. Consiste en no completar ciclos de carga correctamente, provocando una reducción del número de ciclos totales de la batería.
- Corriente de carga máxima. Corriente máxima a la que se puede realizar la carga sin deteriorar la batería.
- Corriente de descarga máxima. Corriente máxima a la que se puede descargar la batería sin deteriorarla.
- Corriente suministrada. Corriente máxima que puede entregar la batería a la aplicación final.

La otra característica crítica es su composición química, no se ha añadido en la lista anterior, ya que muchas composiciones tienen sus propias características anteriores por defecto, por lo que no se podrá elegir entre ellas, descartando por dichas características.

Dentro de las composiciones químicas de las baterías más comunes, destacan las siguientes:

- Baterías de plomo-ácido (PbO₂): Se tratan de baterías cuya tensión de celda está alrededor de los 2V. Su principal aplicación suele ser para motores de arranque, gracias a la gran corriente que son capaces de suministrar. Su tamaño es demasiado grande para aplicaciones móviles.
- Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd): Se tratan de baterías cuya tensión de celda está alrededor de los 1.2V. Su principal aplicación puede ser industrial o doméstica, ya que su tamaño es reducido. La mayor desventaja que tiene es que posee efecto memoria y además el cadmio es un elemento muy contaminante.
- Baterías de níquel-hidruro (Ni-MH): Se tratan de baterías cuya tensión de celda está alrededor de los 1.2V. Al igual que las baterías de Ni-Cd su aplicación es la misma. A diferencia de las anteriores, estas se ven menos afectadas por el efecto memoria, pero tienen un menor número de ciclos.
- Baterías de iones de litio (Li-ion): Se tratan de baterías cuya tensión de celda está alrededor de 3.7V. A diferencia de las anteriores su peso es menor, pero son más costosas. No sufren el efecto memoria. Su mayor inconveniente es que no permiten descargas profundas sin deteriorar la química de la batería. Por lo que se suelen añadir circuitos de protección para evitar este tipo de descargas.

- Baterías de polímero de litio (Li-Po): Se tratan de baterías cuya tensión de celda está alrededor de 3.7V. Carecen de efecto memoria. Su eficiencia es la mejor de las químicas anteriores. Su mayor desventaja es el alto riesgo de explosión que tienen.

Una vez explicadas los tipos de composición química y los parámetros básicos de las baterías, ya se puede realizar una búsqueda y encontrar candidatas.

Para el dispositivo expuesto en este trabajo se ha decidido seleccionar a la empresa Ultralife/Accutronics por la experiencia que se tiene de haber trabajado con ellos en otros proyectos, y la posibilidad de realizar modificaciones en los packs de baterías que suministran.

Se ha decidido utilizar una batería de iones de Litio, ya que se trata de la química que mayor voltaje entrega, en un tamaño reducido y además son más seguras que las de tipo Li-Po.



Figura 12. Batería UBBL39 Li-Ion 2900mAh de Ultralife [9].

Se ha seleccionado una batería de una única celda ya que vamos a utilizar el puerto USB como fuente de alimentación para el cargador, por lo que solo se pueden entregar 5V.

Como ya se ha mencionado antes, este distribuidor nos permite añadir un termopar en el pack de la batería para tener un control sobre la temperatura de trabajo de la batería.

En la siguiente tabla se podrá ver las características de la batería seleccionada.

Product Type	Rechargeable, Battery, Standard Pack
Chemistry	Li-ion
Voltage (Nominal)	3.6 V
Capacity (Nominal)	2.9 Ah
Certifications	UN 38.3
Operating Temperature	-32 to 60 °C
Storage Temperature	-32 to 50 °C

Figura 13. Características de la batería UBBL39 [9].

4.2.2 Selección del módulo de carga.

Antes de analizar las posibles soluciones comerciales que se pueden utilizar para realizar la carga de la batería anterior, habría que distinguir si se quiere utilizar una topología de 2 chips o de 1 chip. Para ello se ha de matizar ambas topologías.

Las topologías de 2 chips suelen ser siempre iguales. El primer chip se utiliza de Gas Gauge, que es el chip encargado de determinar el estado de carga (SoC), además de predecir la vida de la batería y el correcto funcionamiento de esta. El otro chip se utiliza como cargador de baterías, y ambos están comunicados por un bus de comunicaciones tipo SMB o I2C.

En las imágenes siguientes podemos ver los esquemáticos típicos de aplicación de los chips integrados BQ34z100 y BQ24610 del fabricante Texas Instruments. Estos chips se utilizan conjuntamente traducándose en la aplicación que se necesita para este proyecto.

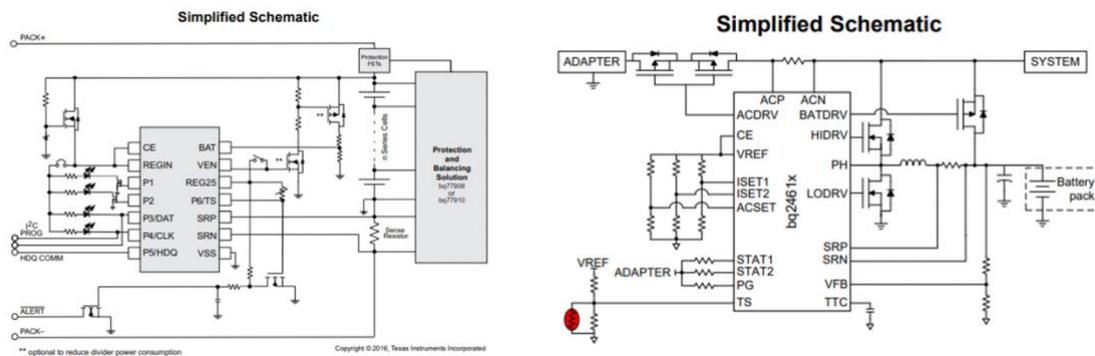


Figura 13. Circuito de cargador comercial en 2 chips. BQ34z100 [10] (izquierda) y BQ24610 [11] (derecha).

Las topologías de un solo chip son integrados que poseen el Gas Gauge y el cargador de baterías en un mismo encapsulado. Estas soluciones son aparentemente mejores porque se reduce el número de componentes a utilizar y solo se necesitaría programar un chip en lugar de dos.

En la imagen siguiente se puede ver el circuito típico de aplicación del chip del fabricante Linear, LTC4100.

TYPICAL APPLICATION

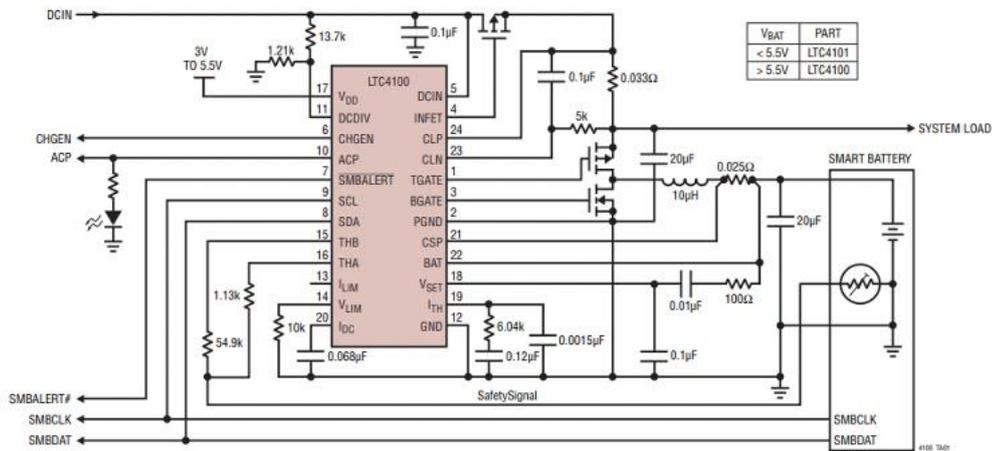


Figura 14. Circuito de cargador comercial de 1 chip. LTC4100 [12] de Linear.

Una vez explicados los tipos de topologías a utilizar, cabe destacar que para este proyecto interesa el uso de un solo integrado, para ahorrar espacios dentro de la PCB y realizar un *layout* más ordenado.

Para ello se ha hecho una búsqueda de mercado en los diferentes como fabricantes como TI, Monolithic, ST, Maxim, Analog Devices, Microchip, ON-Semi, Richtech...

La mayoría de las soluciones son soluciones *stand-alone*, los cargadores de este tipo proporcionan buenas aplicaciones, como la medida de temperatura, pero no te proporcionan la comunicación mediante buses de comunicación, por lo que es un tipo de chip descartado.

En la siguiente tabla se verán los chips analizados con sus pros y sus contras:



<i>Solution</i>	TI	TI	LINEAR	ON	TI
<i>Part Number</i>	BQ257x3	BQ24721C	LTC4100	NCP1871	BQ40z60
Ventajas	<i>Gauge + Charger (I2C)</i>	<i>Gauge + Charger (SMB) NTC</i>	<i>Gauge + Charger (SMB) NTC</i>	<i>Gauge + Charger (SMB) NTC</i>	<i>Gauge + Charger (SMB) NTC LEDs UVP</i>
Desventajas	<i>Charging LED NTC UVP</i>	<i>Charging LED UVP</i>	<i>Charging LED UVP</i>	<i>Charging LED UVP</i>	

Tabla 2. Comparación entre cargadores comerciales.

Como se puede apreciar en la tabla comparativa anterior el integrado seleccionado es el BQ40z60 de Texas Instruments, ya que se trata de un chip muy versátil, destacando sobre todo en el ámbito de las protecciones, que es un punto muy delicado para equipos portátiles.

4.2.3 BQ40z60

El circuito integrado BQ40z60 de Texas Instruments, se trata de una solución de un único chip que se caracteriza por las funciones de carga de batería y control de la salida de la carga, *gas gauging*, y protección autónoma frente a situaciones perjudiciales para las baterías, como puede ser una sobre tensión o una sobre temperatura.

Se trata de un circuito integrado que contiene un cargador de baterías y un microcontrolador dedicado al *gas gauging*. Gracias a su arquitectura, la comunicación entre ambos módulos es prácticamente instantánea, permitiendo de esta forma obtener un perfil de carga óptimo.

Simplified Schematic

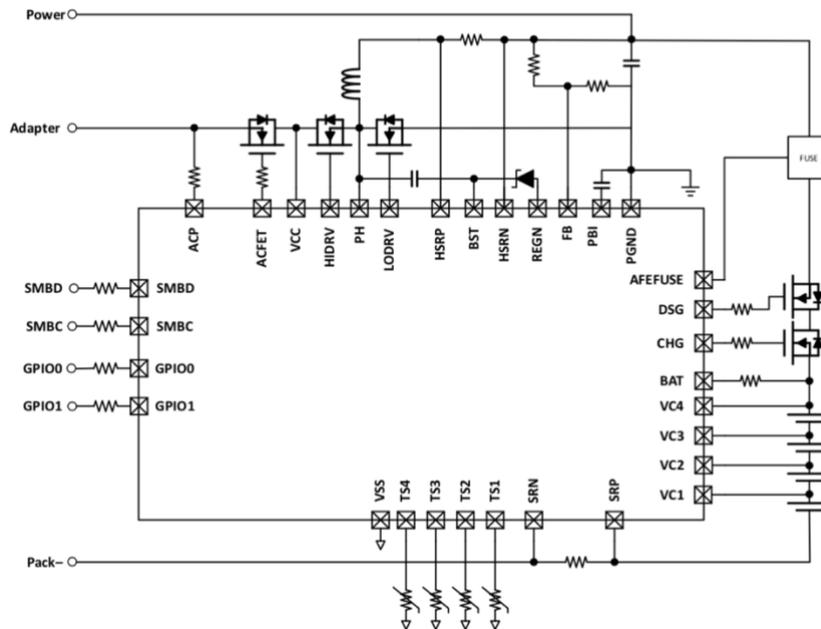


Figura 15. Circuito de aplicación del BQ40z60 [13].

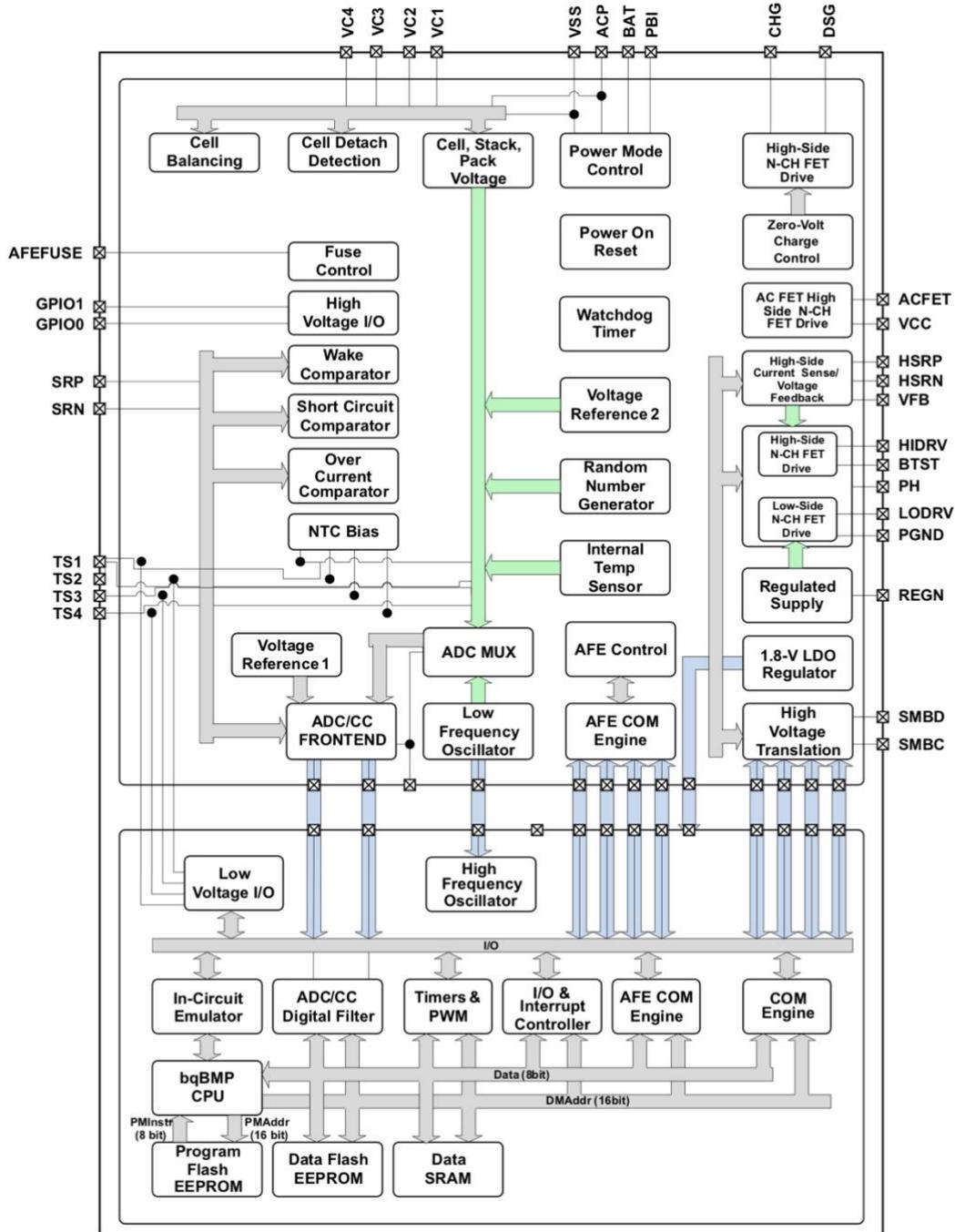


Figura 16. Diagrama de bloques del BQ40z60 [13].

Siguiendo con las características del circuito integrado, el cargador de baterías está basado en un convertidor DC/DC de tipo *Buck*, a una frecuencia de trabajo de 1MHz. Su tensión de trabajo puede ser desde 4V a 25V, por lo que los 5V suministrados por el puerto USB, es suficiente para poder realizar la carga vía USB.

El microcontrolador cuenta con protecciones configurables frente a una sobre corriente, un corto circuito durante la carga y un cortocircuito durante la descarga.

Además, cuenta con un arranque suave, para evitar un gran pico de consumo de corriente. Su corriente de carga es configurable, por lo que lo hace un microcontrolador muy versátil.

Dentro del *datasheet* [13] se puede apreciar que tiene una entrada para poder monitorizar la temperatura de la batería y de esa manera configurar la protección de *overtemperature* y *undertemperature*. Además de poder utilizar los pines de GPIO para mostrar el estado de la carga mediante un LED.

Por último, cabe destacar, que es posible alimentar la aplicación mediante CC y ADC, además de que se comunica mediante SMB Bus. Se trata de un microcontrolador programable mediante modificaciones de registros. Es decir, no se puede programar mediante código. Su programación se realiza mediante la herramienta de trabajo de Texas Instruments llamada BQStudio [14]. Por último, cabe destacar que para su funcionamiento preciso se requiere una serie de pasos llamados *learning cycle* [15] que se describen en el siguiente apartado.

4.2.3.1 Learning Cycle

El *learning cycle*, como su nombre indica se trata de un ciclo de aprendizaje del microcontrolador sobre la batería para obtener un perfil de carga preciso. Además, el microcontrolador es capaz de adecuar la carga en función de las resistencias químicas que presenta la batería, aproximando su salud, durante los ciclos de carga.

Para obtener un perfil de carga óptimo, el primer paso es definir la química de la batería. Para ello se ha de comprobar que la química de la batería a usar existe en las bases de datos de Texas Instruments, como se ve en la siguiente imagen.

Manufacturer	Model	Chemistry ID	Description
360FLY	PR-693231 (815mAh)	1318	LiCoO2/carbon 11
A&TB	LGR18650OU	0100	LiCoO2/graphitized carbon (default)
A01	ALPB4002 (3430mAh)	0207	NiCoMn/carbon 2
A123	APR18650M1 (1100 mAh)	0404	LiFePO4/carbon
A123	26650M1B (2500mAh)	0434	LiFePO4/carbon
A123	ANR26650M1-B (2500mAh)	0440	LiFePO4/carbon
A123	ANR26650M1-B Consult TI before use (2500m...	0453	LiFePO4/carbon
A123 Systems	26650A	0400	LiFePO4/carbon
A123Systems	A123 (20000mAh)	6105	NiMH
AA Portable Power	LFP-18650-1500 (1500 mAh)	0439	LiFePO4/carbon
AAPortable	26650 (3300mAh)	0451	LiFePO4/carbon
AAPortable	8790160 (10000mAh)	0456	LiFePO4/carbon
Acebel	ECFV1260 (60Ah)	0807	Lead Acid
AEenergy	AE1004765 (3500mAh)	0131	LiCoO2/carbon 4
AEenergy	AES83696PM1HR (2150 mAh)	0222	PSS, LiNiO2 with Co, Mn doping
AET	TP2000-1SPL (2000mAh)	0190	LiCoO2/carbon 11
AGM	INR34600K2 (7500mAh)	0210	NiCoMn/carbon
AISPU	3872C8 (5100mAh)	1335	LiCoO2/carbon 11
AISPU	856360 (4750mAh)	3636	LiMn2O4 (Co,Ni)/carbon, 4.35V
ALE	045062 (2300 mAh)	1254	LiNiCoMnO2/SGenNoI, 4.2V
ALE	ALE073470 (1700mAh)	2047	NiCoMn/carbon
Alees	26700FE (3300mAh)	0411	LiFePO4/carbon
Alees	A2770102 (13000mAh)	0412	LiFePO4/carbon
Amata	IPC 776785M	0704	NiCoMn/carbon

Figura 17. Base de datos de las químicas de las baterías.

En el caso de que no existiera, se deberá de extraer los datos de una descarga total y una carga completa del BQStudio, y subirla al repositorio de Texas Instruments para su análisis y



comparación. Ellos se encargan de aconsejarte cuál es la batería con mayor porcentaje de similitud a la utilizada.

El segundo paso es hacer correr el ciclo de aprendizaje de la batería, para ello se ha de consultar los anexos SLUA903 [16] de Texas Instruments, ya que se trata de un proceso delicado. Tras muchos meses de lectura y reuniones con el fabricante, ya que se trata de un microcontrolador del que se posee un conocimiento amplio por su uso en otros proyectos, se ha intentado plasmar de forma concisa el proceso.

Una vez configurados los parámetros de la química, los siguientes parámetros a configurar, son los de tensión y corriente, para ello los anexos nos dicen que se han de modificar los siguientes parámetros. Pero antes se ha de definir las características de la aplicación.

- Voltaje de carga: 4200 mV
- Capacidad: 2900 mAh
- Corriente de finalización de carga: 52 mA
- Voltaje de terminación: 3000 mV
- Voltaje de diseño: 3700 mV
- Energía de diseño: 3.7V*2900mA/10

<i>Section</i>	<i>Subsection</i>	<i>Name</i>	<i>Value</i>
<i>Advanced Charge Algorithm</i>	<i>Low Temp</i>	<i>Voltage (mV)</i>	4200
<i>Advanced Charge Algorithm</i>	<i>Standard Temp</i>	<i>Voltage (mV)</i>	4200
<i>Advanced Charge Algorithm</i>	<i>High Temp</i>	<i>Voltage (mV)</i>	4200
<i>Advanced Charge Algorithm</i>	<i>Rec Temp</i>	<i>Voltage (mV)</i>	4200
<i>Gas Gauging</i>	<i>FC</i>	<i>Set Voltage (mV)</i>	4200
<i>Gas Gauging</i>	<i>FC</i>	<i>Clear Voltage (mV)</i>	4100
<i>Gas Gauging</i>	<i>TC</i>	<i>Set Voltage (mV)</i>	4200
<i>Gas Gauging</i>	<i>TC</i>	<i>Clear Voltage (mV)</i>	4100
<i>Gas Gauging</i>	<i>State</i>	<i>Cell 1 Chg@EOC</i>	4190
<i>Gas Gauging</i>	<i>IT Cfg</i>	<i>Term Voltage</i>	3000



<i>Gas Gauging</i>	<i>Design</i>	<i>Design Voltage</i>	3700
--------------------	---------------	-----------------------	------

Tabla 3. Parámetros de diseño en tensión del cargador.

<i>Section</i>	<i>Subsection</i>	<i>Name</i>	<i>Value</i>
<i>Advanced Charge Algorithm</i>	<i>Term Config</i>	<i>Taper Current (mAh)</i>	52
<i>Gas Gauging</i>	<i>Design</i>	<i>Design Capacity (mAh)</i>	2900
<i>Gas Gauging</i>	<i>Design</i>	<i>Design Capacity (cWh)</i>	962
<i>Gas Gauging</i>	<i>State</i>	<i>QMax Cell 1 (mAh)</i>	2900
<i>Gas Gauging</i>	<i>State</i>	<i>Current at EOC</i>	52
<i>Gas Gauging</i>	<i>Current Threshold</i>	<i>Quit Current (mAh)</i>	40
<i>Gas Gauging</i>	<i>Current Threshold</i>	<i>Chg Current Threshold</i>	50
<i>Gas Gauging</i>	<i>Current Threshold</i>	<i>Dsg Current Threshold</i>	400

Tabla 4. Parámetros de diseño en corriente del cargador.

Una vez modificados los parámetros de tensión y corriente para nuestra aplicación, el siguiente paso es realizar una descarga completa a corriente constante. Tras descargar la batería se deberá dejar relajando, hasta que se active el registro [REST]=1.

Tras la relajación, se deberá iniciar la carga a una corriente constante recomendada como $C/2$. Una vez lleguemos a la tensión máxima de la batería y el registro [VCT]=1, se deberá relajar la batería al igual que en el paso anterior, hasta que se active el registro [REST]=1.

Por último, se realizará una descarga al igual que en el primer paso, obteniendo de esta manera un SoC (State of Charge) óptimo, con un error inferior al 1%.

Full Learning Cycle

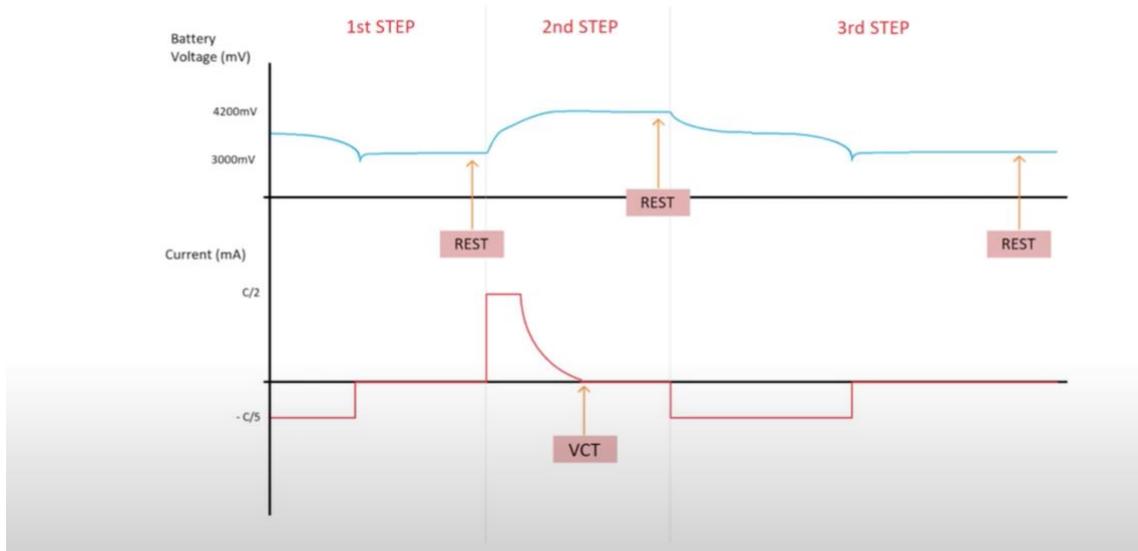


Figura 18. Proceso de aprendizaje del microcontrolador [15].

Capítulo 5. Diseño de esquemáticos.

Una vez se han seleccionado los componentes críticos que formaran parte del módulo de comunicaciones, el siguiente paso a realizar es la integración de dichos componentes en un único circuito electrónico. Para ello, lo primero que se ha de definir es la alimentación del sistema. Como se seleccionó en el apartado anterior, una batería de una celda, por lo habituales que son en el mercado actual, se necesita una tensión mayor para realizar la carga de dicha celda.

5.1 USB TIPO C

Como fuente de alimentación externa, ya que se trata de un módulo portátil, se ha decidido habilitar la comunicación USB 3.0. Según el standard de USB [17], la versión 3.0 proporciona una tensión de 5V y una corriente de hasta 1A. Por lo que se trata de una solución óptima, ya que se podrá cargar la batería sin problemas y además utilizar la interfaz para actualizar el firmware de la aplicación.

Otro punto para tener en cuenta es que se ha seleccionado usar un conector de tipo C para la comunicación USB 3.0, ya que este permite la conexión del cable en cualquiera de los sentidos, y es menor en tamaño que los demás conectores.

En la imagen siguiente se puede ver como queda el conexionado del USB en el esquemático:

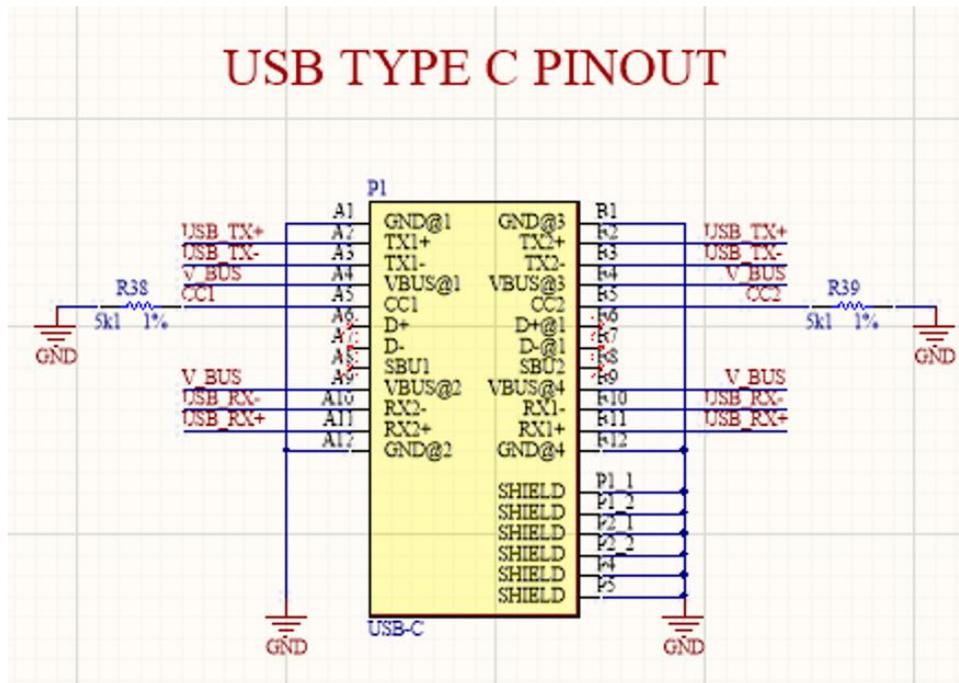


Figura 19. USB 3.0 tipo C pinout.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el USB 3.0 tipo C cuenta con varias señales de alimentación, llamadas V_BUS, señales de transmisión y recepción, llamadas USB_TX y USB_RX, y las señales CC1 y CC2, que indican si el módulo es receptor o transmisor. En este caso es receptor, ya que recibimos la alimentación del cargador, y los datos de actualización del firmware. En el caso de que lo quisiéramos hacer transmisor, las resistencias de 5k1 ohmios deberán estar conectadas a Vcc en lugar de a GND.

5.2 Alimentación del circuito

Ahora que ya se sabe la tensión de la fuente de alimentación externa, hay que definir las alimentaciones que necesitamos para poder alimentar los demás módulos que estamos integrando bajo el mismo circuito electrónico. Como ya se sabe, la alimentación principal del módulo proviene de la batería de este, por lo que la tensión de alimentación será como mínimo de 2.5V cuando esta descargada, y de 4.2 si esta completamente cargada.

El microcontrolador AG15 tiene dos alimentaciones distintas según su *datasheet*, una alimentación de 3.3V para la *baseband* y una alimentación de 5V para la parte de RF. Por lo que aquí se encuentra un problema, ya que si utilizamos directamente la alimentación de la batería nunca se puede alimentar la parte de RF, y la *baseband* dejaría de estar alimentada una vez la batería esté por debajo de la mitad de su carga.

Este problema se puede solucionar de dos maneras distintas que se pueden apreciar en los diagramas de bloques siguientes:

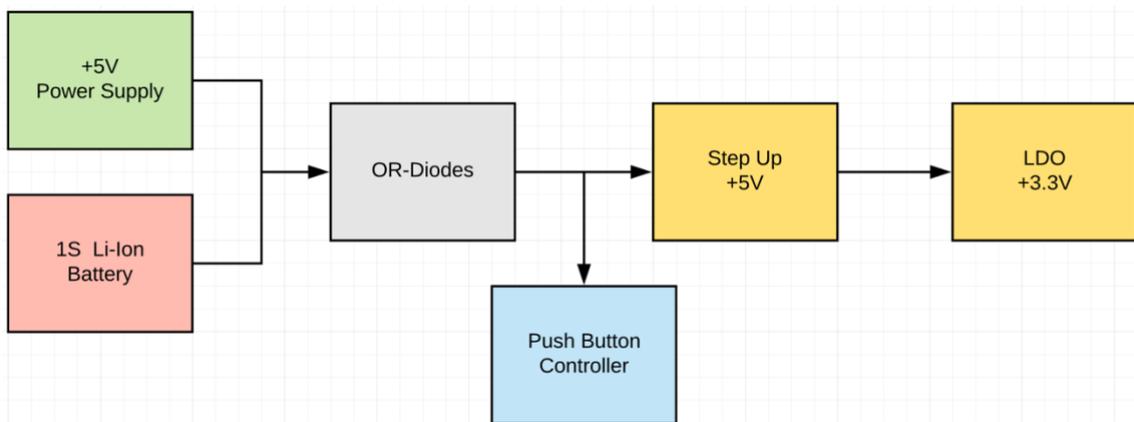


Figura 20. Topología de alimentación de la aplicación. Solución número 1.

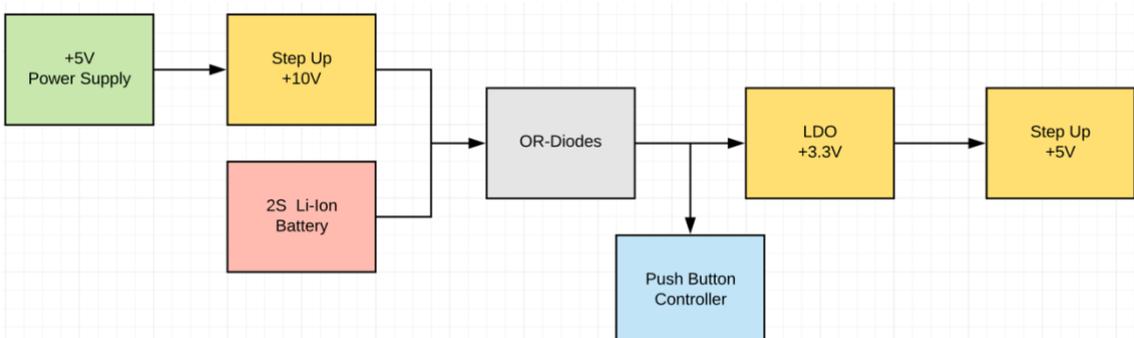


Figura 21. Topología de alimentación de la aplicación. Solución número 2.

Para esta aplicación, se ha decidido utilizar la solución número 1 ya que, es una solución que cuenta con menos convertidores DC/DC y además mantiene la batería seleccionada anteriormente y no se aumenta el número de celdas.

La solución número 2 se descartó, debido a que, al utilizar una batería de 2 celdas, la tensión de esta es mayor a la tensión del USB, se ha de añadir un *step up*, para conseguir cargar la batería. Además, si se quiere utilizar el 100% de la capacidad de la batería habría que añadir un convertidor más para siempre garantizar la alimentación de 3.3V una vez la batería este cerca de estar totalmente descargada. Por lo que la primera solución tiene menos componentes y se trata de una solución más asequible.

Por lo que la arquitectura del módulo de comunicaciones y su integración en el esquemático quedarían de la siguiente manera:

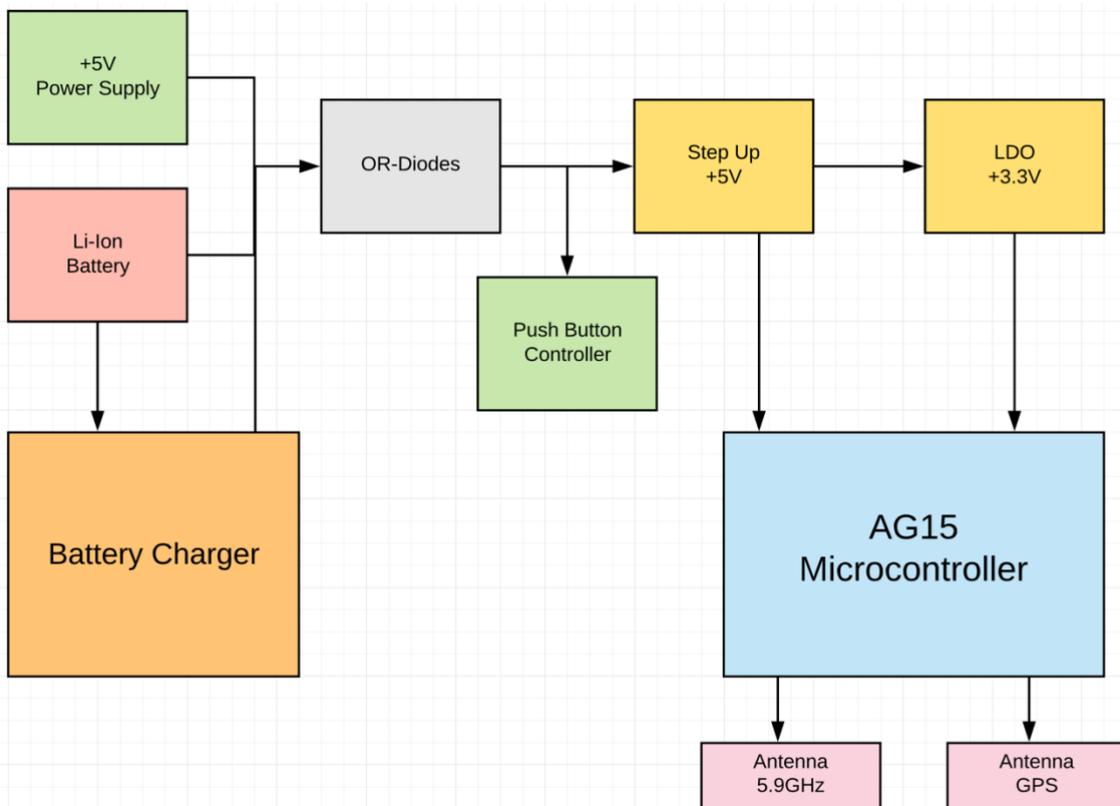


Figura 22. Diagrama de bloques de la aplicación.

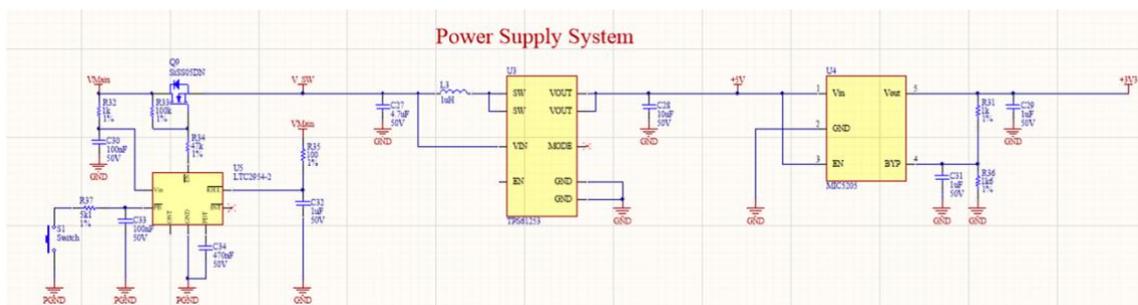


Figura 23. Implementación de la topología de alimentación en el esquemático.

En los siguientes apartados se expondrán los distintos bloques de la topología para tener un buen conocimiento de la aplicación.

5.2.1 Controlador del botón

Como se podrá ver en el apartado del cargador de baterías, se ha habilitado la posibilidad de alimentar el módulo de comunicaciones desde la batería y desde la conexión del USB. El único inconveniente del circuito del cargador de baterías se trata de que una vez tiene batería o alimentación, el resto de la electrónica se encendería, por lo que se podría descargar la batería sin estar utilizando el módulo.

Para solucionar este pequeño inconveniente, se ha implementado un controlador de la pulsación del botón, por lo que ahora se puede configurar la pulsación del botón vía hardware. El componente seleccionado para realizar esta acción se trata del *part number* comercial LTC2954-2 [18] de Linear.

Mediante los condensadores conectados al pin ONT y el pin PDT, se configura la duración de la pulsación para el encendido y apagado, respectivamente.

Como se puede ver en la siguiente imagen, no se ha conectado ningún condensador en el pin ONT, para de esta manera encender el módulo con cualquier pulsación. Mientras que en el pin PDT, se ha conectado un condensador de 470nF, que hará que se necesiten 3 segundos para apagar el módulo de comunicaciones.

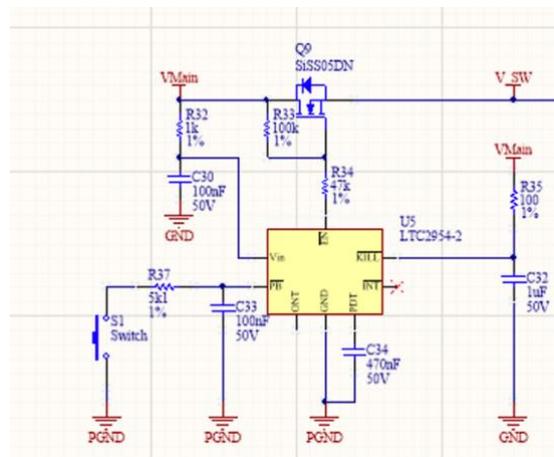


Figura 24. Integración del controlador del botón en el esquemático.

Gracias a que el circuito integrado es del fabricante Linear, esto nos permite poder realizar simulaciones para asegurar que el diseño de esta etapa es correcta, gracias al software de simulación LTSpice [19]. Para ello se ha parametrizado los diferentes tipos de pulsación que puede tener el botón y su respuesta.

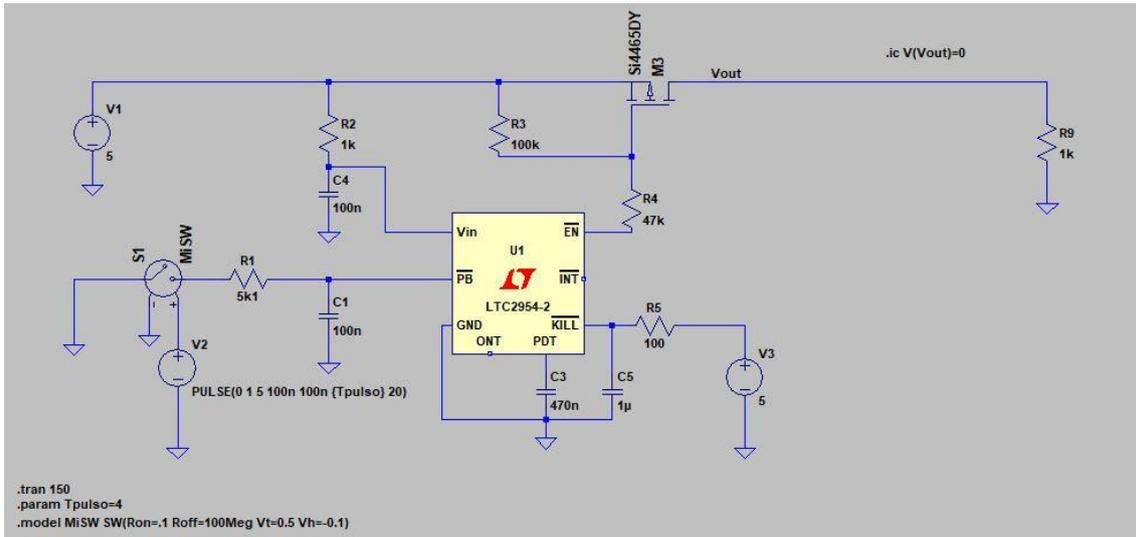


Figura 25. Circuito de simulación del controlador del botón en LTSpice.

En las siguientes imágenes se verán los escenarios de una pulsación de 1 segundo de duración (Escenario 1) y la pulsación de 4 segundos de duración (Escenario 2). En ambos escenarios la señal de color verde se trata de la pulsación, mientras que la azul se trata de la tensión del sistema.

Como ya se mencionó anteriormente, la pulsación de 1 segundo debe iniciar el sistema siempre, mientras que esta misma pulsación no debe apagar el dispositivo.

En el segundo escenario la pulsación superior a 3 segundos debe encender el sistema y apagar el dispositivo como se puede ver en la segunda imagen.

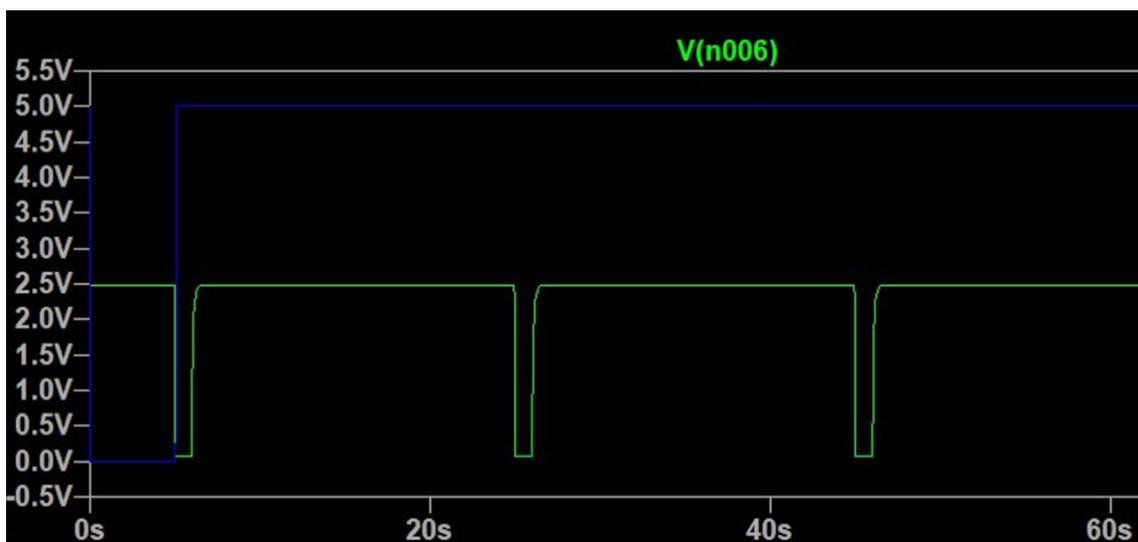


Figura 26. Simulación de una pulsación corta, duración de 1 segundo.

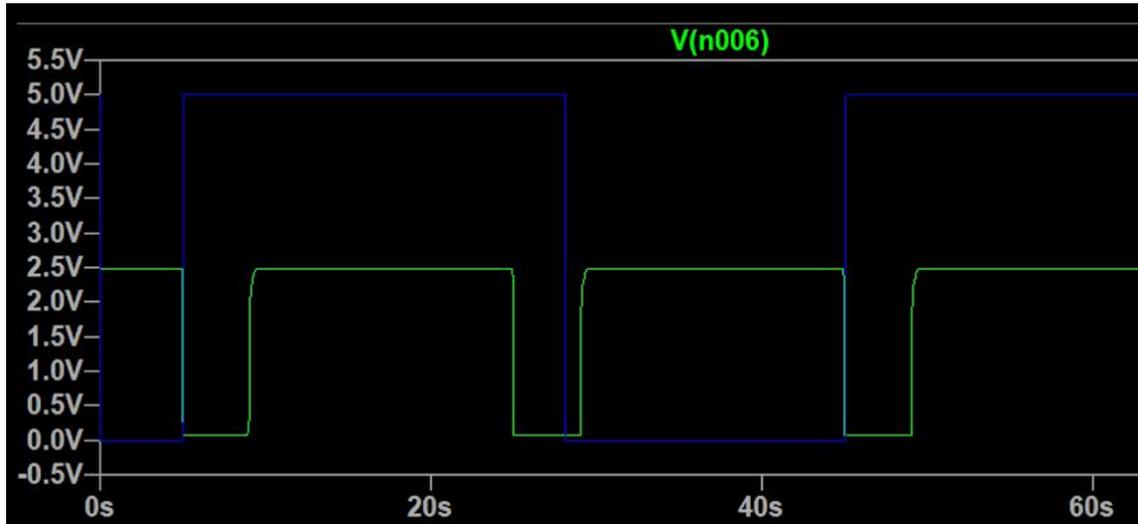


Figura 27. Simulación de una pulsación continuada, duración de 3 segundos.

5.2.2 Alimentación de 5V

Como ya se ha comentado anteriormente, se necesitan 5V para poder alimentar la parte de RF, además de que esta alimentación puede venir de la conexión del USB (5V) o de la batería (4.2V como máximo). Por lo que es necesario utilizar un convertidor DC/DC que permita alcanzar un valor de tensión mayor que la que posee el sistema. Por lo que haciendo uso de la herramienta online de diseño del fabricante Texas Instruments, se encontró que la mejor solución sería el *part number* TPS61253 [20]. Dicho convertidor se trata de un convertidor de tipo *Boost (Step-up)* cuya entrada mínima es de 2.65V y la entrada máxima 5V por lo que encaja perfectamente con la aplicación. Este convertidor garantiza en todo caso que a su salida siempre aparezcan 5V independientemente de su entrada. En la imagen siguiente se puede ver su integración en el esquemático:

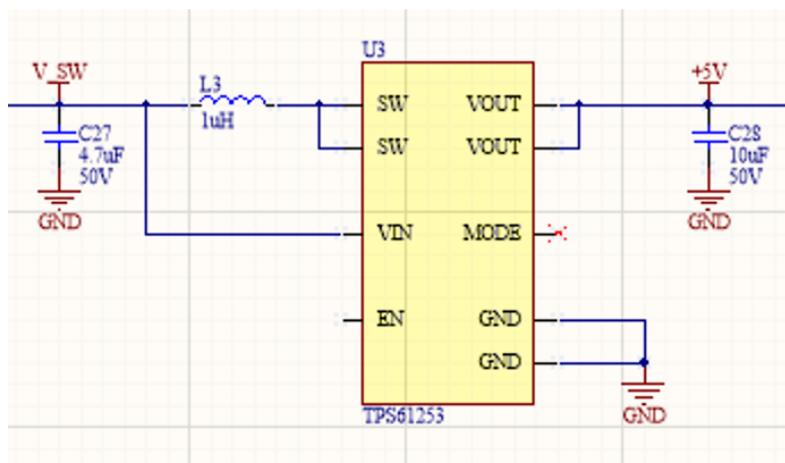


Figura 28. Integración del integrado TPS61253 en el esquemático.

Por último, cabe destacar, que para la elección de este componente además se tuvo en cuenta, el tamaño del encapsulado, que se trata de una BGA de tamaño 1.236 mm x 1.336 mm.

5.2.3 Alimentación de 3.3V

Al igual que en el apartado anterior, el microcontrolador necesita otra alimentación de 3.3V para alimentar a la *baseband* de este. También se ha comentado la problemática de que utilizando una sola celda de batería, habría momentos durante su capacidad de carga en los que no sería capaz de suministrar lo necesario para alimentar el microcontrolador. Por lo que se ha decidido utilizar un LDO (*Low Dropout Regulator*) para reducir la tensión de 5V a 3.3V, por lo que se conectará a la salida del convertidor *Boost* anterior. Para este cometido se ha utilizado el *part number* comercial MIC5205 [21] del fabricante Microchip. En la siguiente imagen se puede ver su implementación dentro del esquemático.

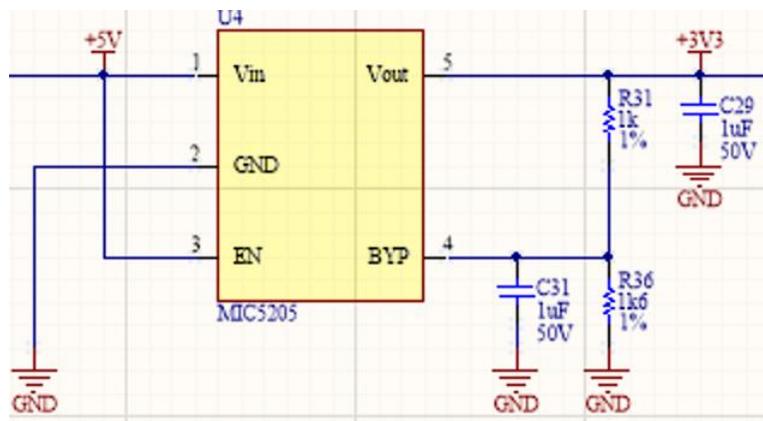


Figura 29. Integración del integrado MIC5205 en el esquemático.

Siguiendo con la tónica del proyecto, para su selección se ha tenido en cuenta el tamaño de su encapsulado, en este caso se trata de un SOT23.

5.3 Cargador de baterías

Como ya se trató en capítulos anteriores, el cargador de baterías se va a diseñar usando el circuito integrado del fabricante Texas Instruments, BQ40z60. Dicho cargador de baterías está basado en un convertidor DC/DC que se explicará a continuación su composición y su implementación dentro del esquema electrónico. Además, otro tipo de componentes críticos para la topología del cargador de baterías serán explicados en detalle para el conocimiento total de la topología. En el diagrama de bloques siguiente se puede tener un concepto de cómo está estructurado el cargador de baterías:

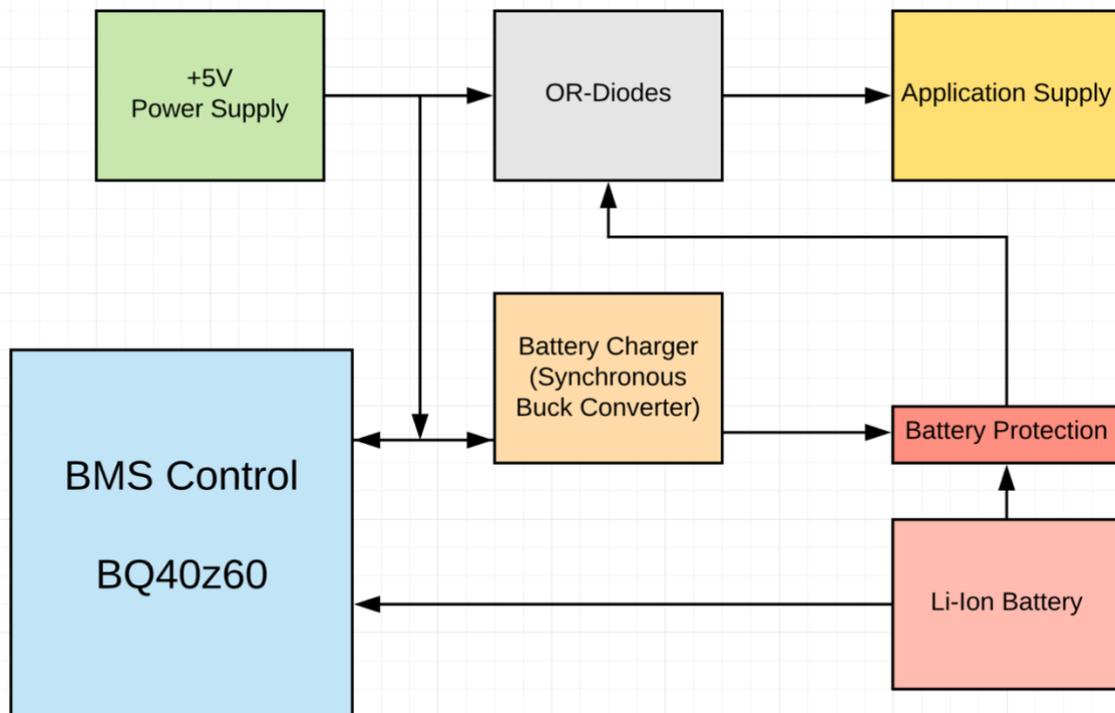


Figura 30. Diagrama de bloques del cargador de baterías.

El convertidor DC/DC reductor síncrono es la topología de potencia en la que se basa el cargador de batería. Tiene el objetivo de bajar los + 5V en la entrada a un voltaje variable controlado para cargar la batería correctamente con una corriente controlada según el perfil de carga que se podrá ver más adelante.

Como se comentó anteriormente, el cargador de batería se basa en un convertidor reductor síncrono no aislado controlado por Texas Instruments bq40z60. El perfil de progreso de carga se muestra a continuación y tiene cuatro etapas principales: precarga, corriente constante, voltaje constante y terminación. Durante la etapa de precarga, se aplica una corriente baja hasta que el voltaje de la batería supera un voltaje preestablecido. Después de esta etapa, comienza la etapa de corriente constante, donde se aplica una corriente máxima controlada a la batería. A medida que la batería se carga, su voltaje aumenta hasta alcanzar el voltaje de carga completa de la batería (4.2V en una batería de iones de litio 1S). En este punto, comienza la etapa de voltaje constante,

donde la corriente de carga comienza a disminuir manteniendo el voltaje constante hasta que la corriente de carga cae por debajo de un umbral llamado I_{term} . En este punto, comienza la etapa de terminación ya que la batería está completamente cargada. En esta etapa, se aplica una corriente de mantenimiento a la batería para mantener la batería completamente cargada.

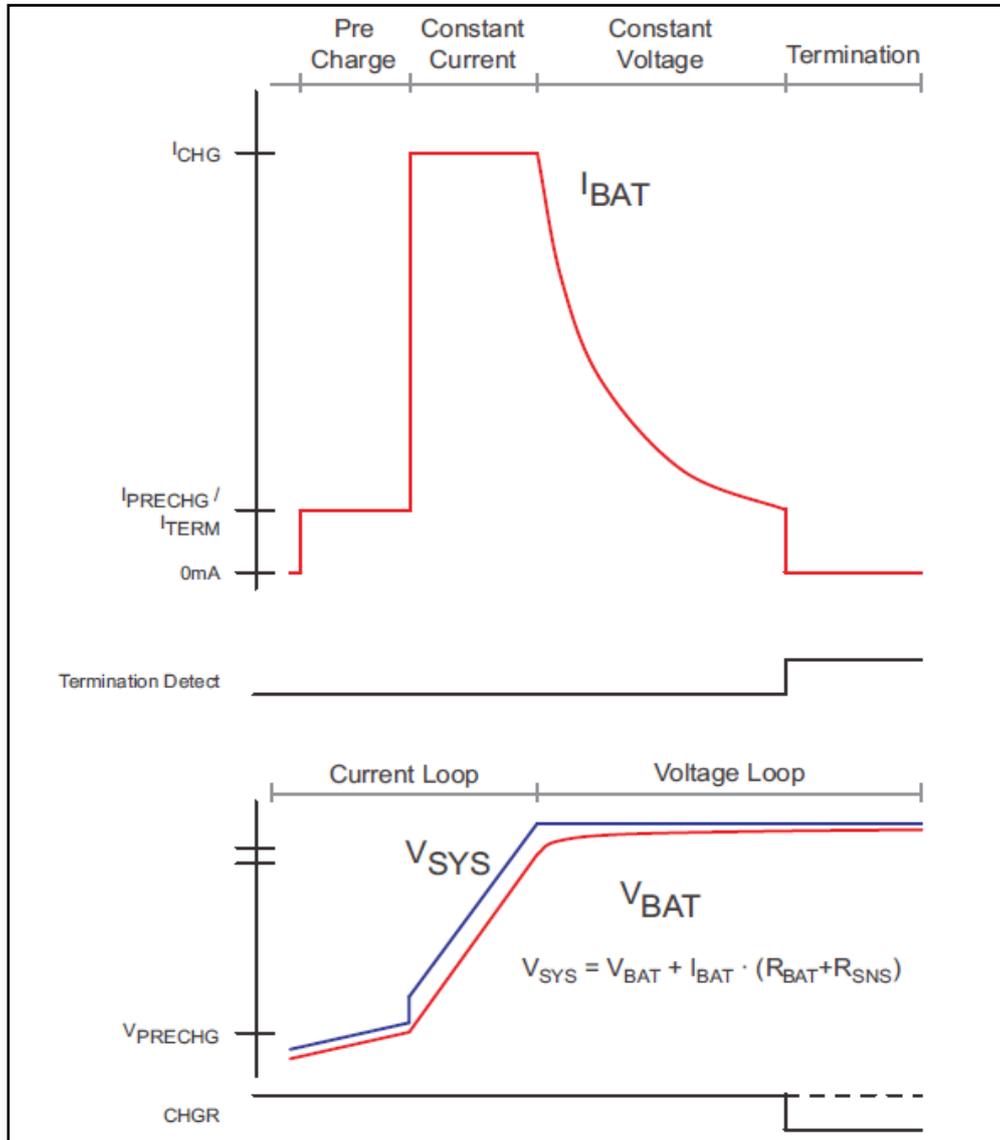


Figura 30. Perfil de carga de la batería. Etapas [15].

Una vez explicada la función del DC/DC, se ha de explicar el funcionamiento y composición de este convertidor en el cargador de la batería, ya que se trata de uno de los módulos más críticos de todo el diseño. Para ello se explicará brevemente el circuito ideal de un convertidor *Buck*.

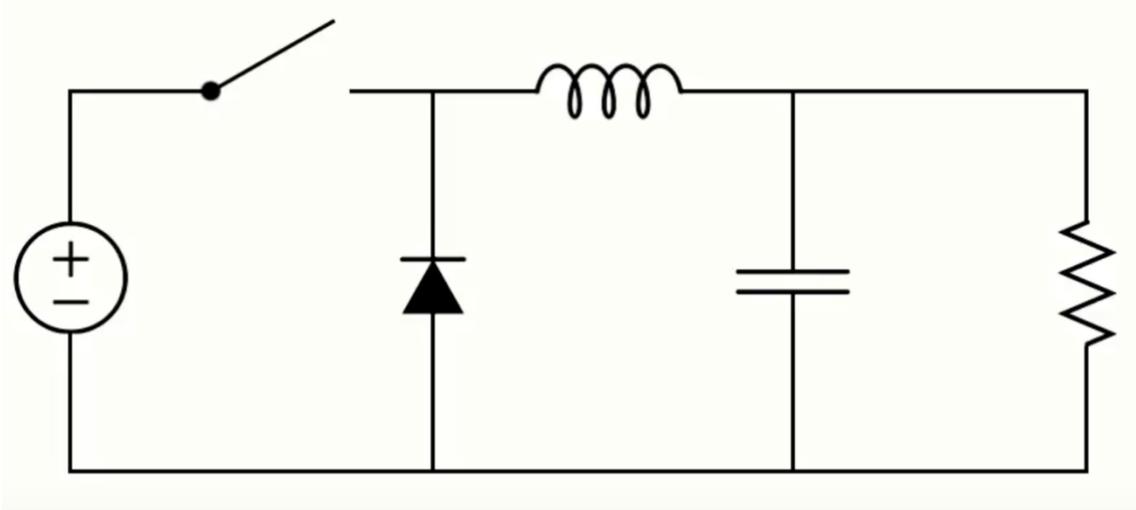


Figura 31. Circuito ideal del convertidor *Buck*.

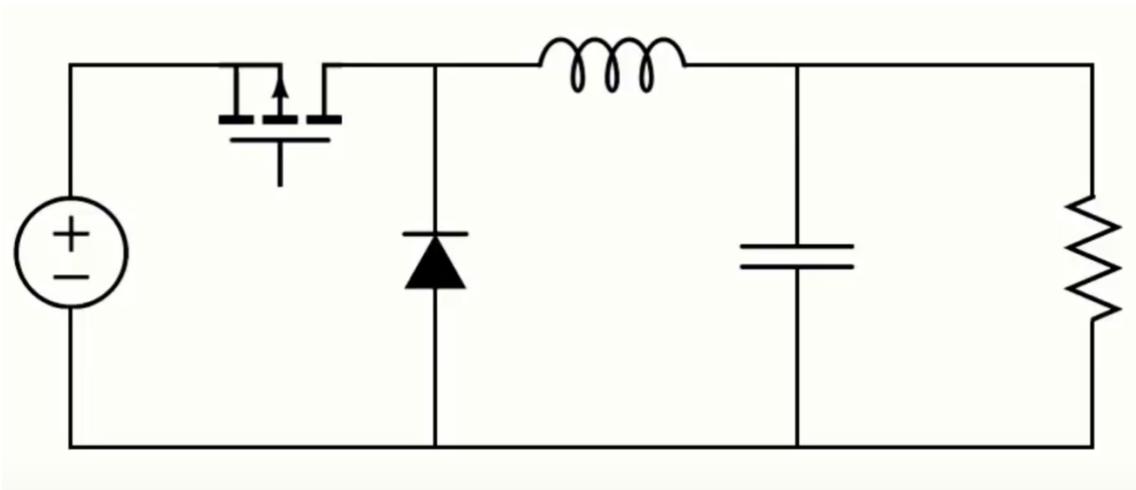


Figura 32. Circuito del convertidor *Buck* con MOSFET.

Como se pueden ver en las dos imágenes anteriores, los circuitos son idénticos a diferencia de que en el segundo se cambia el *switch* por un MOSFET, que es más eficiente y puede ser controlado por una señal del microcontrolador, como una señal PWM.

El convertidor *Buck* consiste en un reductor de la tensión de la entrada mediante la conmutación rápida del MOSFET para recortar la señal de entrada. Se utiliza un condensador a la salida, que se carga para evitar que la tensión deseada descienda por debajo de los umbrales definidos. La carga de un condensador se realiza prácticamente instantánea, por lo que es necesario limitar esta corriente de carga para proteger el circuito. Como añadir una resistencia acabaría produciendo pérdidas por calor, se añade una bobina que permite limitar la corriente del circuito. Por último, se añade un diodo para añadir otro camino de tierra y poder proteger el circuito de los picos de corriente provenientes de la bobina. En este caso, el diodo se utilizará el diodo interno del

MOSFET, por lo que la configuración tendrá un MOSFET de *high side* y un MOSFET de *low side*.

La siguiente imagen muestra los principales componentes del convertidor reductor síncrono resaltados:

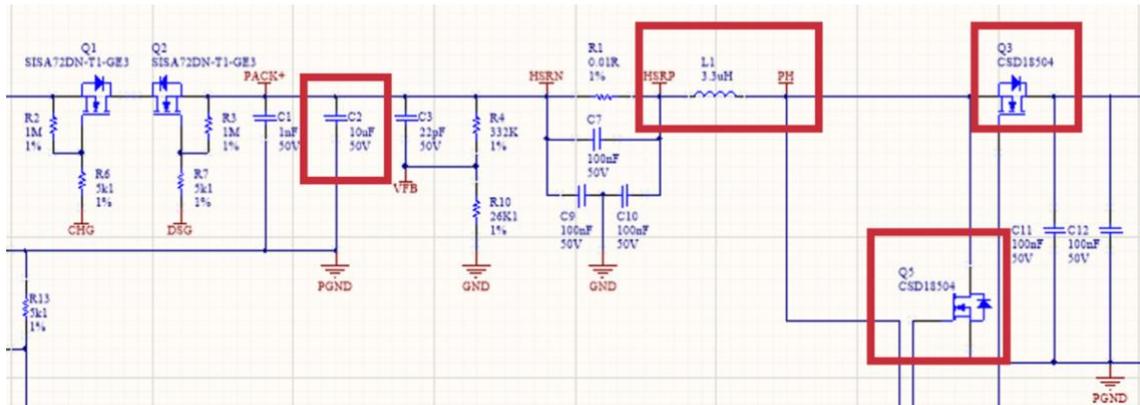


Figura 33. Integración del convertidor DC/DC en el esquemático.

Los componentes Q5 (MOS de *low side*) y Q3 (MOS de *high side*) son los dos MOSFET de potencia que conforman la celda de conmutación. Estos MOSFET cambiarán a 1MHz para cortar la señal de entrada y bajarla al voltaje necesario para cargar la batería y son controlados por el controlador BQ40z60. Dado que estos MOSFET se conmutan a 1MHz, la aplicación requiere MOSFET de conmutación rápida para minimizar las pérdidas de conmutación, a la vez que es capaz de soportar los 5V de la fuente de alimentación. Los MOSFET elegidos son Texas Instruments CSD18504 [22]:



Figura 34. CSD18504 [22].

Tras consultar el datasheet del MOSFET, se puede apreciar que pueden aguantar una tensión de hasta 24V entre la fuente y el drenador, que posee una baja Q_g de 7.7 nC y una carga de Miller de 2.4 nC. Las pérdidas de conmutación son las siguientes:

- Corriente de puerta: $I_g = \frac{4.5}{10} = 0.45 \text{ A}$
- Puerta-Fuente carga de condensador: $T_1 = \frac{Q_{gs}}{I_g} = \frac{3.2}{0.45} = 7.1 \text{ ns}$
- Carga de condensador Miller: $T_2 = \frac{Q_{gd}}{I_g} = \frac{2.4}{0.45} = 5.3 \text{ ns}$
- Energía en T_1 : $ET_1 = \frac{V_{ds} * I_d}{2} * T_1 = \frac{5 * 0.466}{2} * 7.1 \text{ ns} = 8.3 \text{ nJ}$
- Energía en T_2 : $ET_2 = \frac{V_{ds} * I_d}{2} * T_2 = \frac{5 * 0.466}{2} * 5.3 \text{ ns} = 6.2 \text{ nJ}$
- Pérdidas de conmutación: $P_{sw} = 2 * (ET_1 + ET_2) * f_{sw} = 2 * (8.3 \text{ nJ} + 6.2 \text{ nJ}) * 1\text{MHz} = 0.029 \text{ W}$.
- Pérdidas de conducción: $P_{con} = I_{ds}^2 * R_{dson} = 0.466^2 * 0.014 = 0.003 \text{ W}$.
- Total de pérdidas = $0.029 + 0.003 = 0.032 \text{ W}$

Asumiendo el peor caso que puede presentar la huella del componente respecto a la temperatura, el incremento que presenta frente a la temperatura ambiente es $125^\circ\text{C}/\text{W}$, por lo que $125 * 0.032 = 4^\circ\text{C}$ de incremento.

La bobina que, junto al condensador de carga, forman el típico filtro LC de las topologías Buck, se ha diseñado acorde al datasheet del BQ40z60. En dicho documento se puede ver la recomendación de diseñar estos valores de L y C entre las frecuencias de resonancia de 21 kHz y 27 kHz. Por lo que se ha seleccionado un valor de bobina de 3.3 uH y un valor de condensador de 10 uF. Lo que reporta la siguiente frecuencia de resonancia:

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3.3\text{nH} * 10\text{uF}}} = 27.7 \text{ kHz}.$$

La bobina seleccionada es el part number IHLP-2020BZ-01 de Vishay. Esta tiene un tamaño de 5 mm x 5 mm y se trata de una bobina *shielded*, con una frecuencia de auto resonancia de 30 MHz (30 veces mayor que la frecuencia de conmutación).

Se ha seleccionado un condensador de 10uF y 50V en un encapsulado 0402 para ahorrar espacio a la hora de realizar el enrutado de la pcb.

Cuando Q3 esta cerrado y Q5 abierto, la corriente fluye por L1 desde la entrada hasta el condensador de salida cargandolo. Seguidamente Q3 se abre y Q5 se cierra para descargar la bobina. Una vez la bobina se descarga, el Q3 se vuelve a cerrar y Q5 se vuelve a abrir, repitiendo de esta manera el ciclo. El BQ40z60 aplica un retraso para evitar que ambos MOSFETs esten abiertos en el mismo momento.

El proceso anterior describe la carga del condensador de salida C2 y que provee al BMS la tensión de carga. Este voltaje esta controlado por un lazo cerrado de control y recibe el feedback del divisor de tensión formado por las resistencias R4 y R10.

La corriente de carga es la corriente que fluye por la bobina diseñada anteriormente, esta corriente se monitoriza por una resistencia Shunt R1 de valor 10 mOhms, recomendado por Texas Instruments. Esta resistencia tiene un encapsulado de 2510.



Figura 35. Condensador de carga (izquierda), bobina limitadora de corriente (centro) y Shunt (derecha).

La corriente de carga fluye a través del *Shunt* y genera una caída de voltaje acorde a la ley de Ohm. Este voltaje es usado por un lazo de control de corriente para ajustar la corriente de carga. Los condensadores C7, C9, C10, son de 100 nF 50 V para filtrar ruido en modo común y en modo diferencial generado por la conmutación de los MOSFETs.

Los componentes L2, C8, C11, C12, C13, C14, y R8 forman un filtro PI para mitigar el ruido que proviene del convertidor y reducir las emisiones electromagnéticas. Estos componentes ayudarían al cumplimiento de las pruebas de EMC, y su valor es empírico.

Los condensadores C4, C5, C6, forman un *array* de condensadores de *bulk* para almacenar energía de reserva para la alimentación del sistema. El valor de 22 uF de estos condensadores están recomendados por Texas Instruments.

Una vez justificado la selección de la mayoría de las componentes, cabe destacar como se distribuye la dirección de las corrientes durante el funcionamiento del BMS. Para ello se ha dibujado sobre el esquemático los sentidos de las corrientes en funcionamiento.

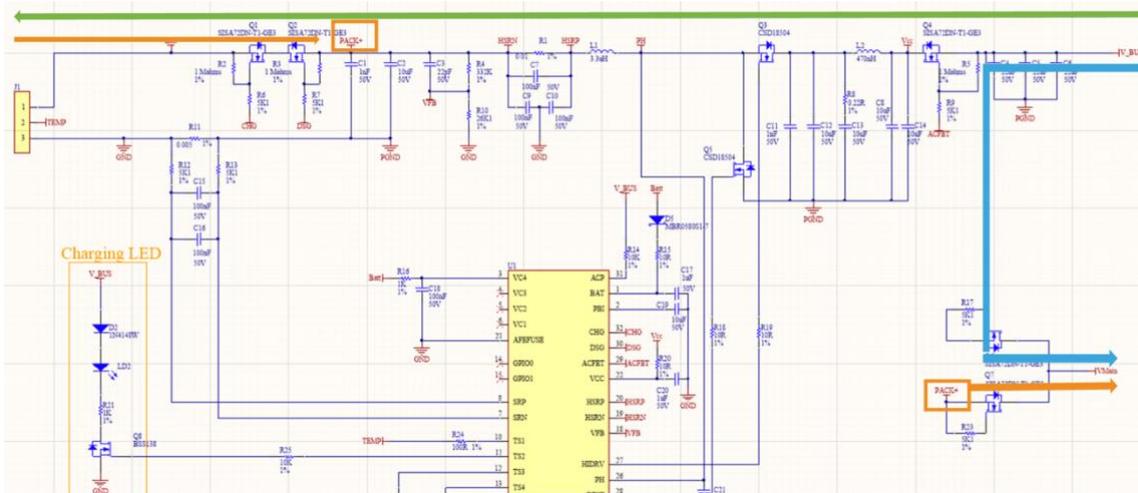


Figura 38. Sentido de las corrientes de la aplicación.

Como se puede ver a la izquierda del circuito, aparecen dos MOSFET de canal N (Q1 y Q2) en serie conectados con la batería, que trabajan como un interruptor, para aislar la batería del cargador en el caso que se produzca un fallo. Estos MOSFETs son los SiSA72DN, que más adelante también se utilizarán.

Cuando la batería esta trabajando correctamente, Q1 y Q2 están activados, y la corriente fluye desde la batería a la carga si la alimentación esta desconectada, o desde la alimentación a la batería mientras la carga. Si se produce un fallo, ambos MOSFETs se abren aislando la batería.

Estos mismos MOSFETs se han utilizado para formar los OR-Diodos, que permiten que el sistema se alimente tanto de la alimentación que proviene del USB, como de la alimentación que proviene de la batería. Se ha decidido utilizar los diodos de los MOSFET SiSA72DN ya que tienen un encapsulado muy pequeño, 3.3mm x 3.3mm, y permiten una gran disipación de potencia gracias a esto, un aspecto importante en un cargador de baterías.

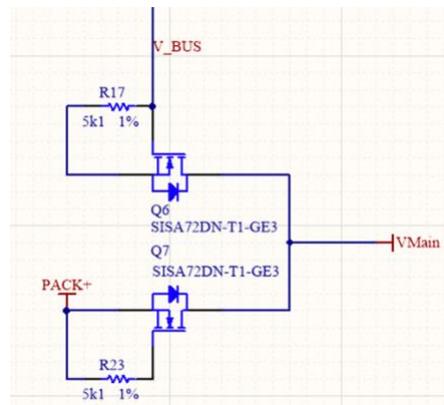


Figura 37. OR-DIODES

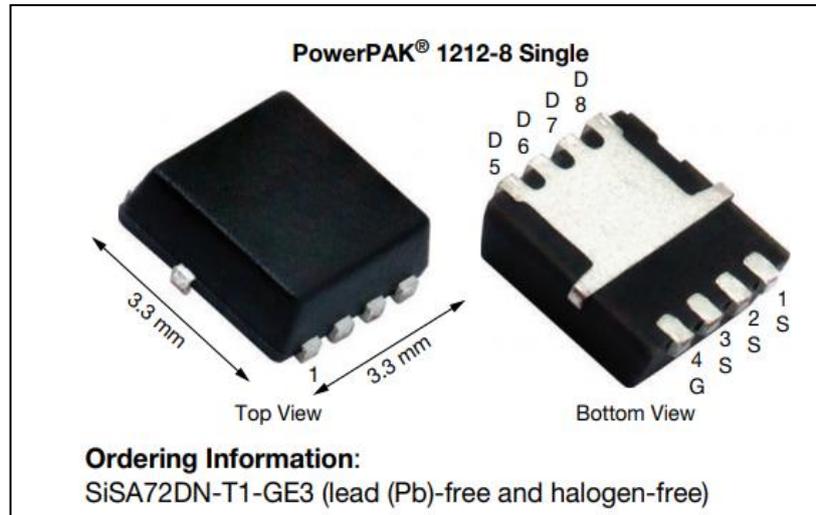


Figura 38. SiSA72DN [23].

Los diodos internos de los MOSFET pueden aguantar hasta una corriente de 47.5 A en modo continuo según su *datasheet*, además de una $V_{forward}$ de 1.1V. Por último, el voltaje inverso es de 40V como máximo. Por lo que con su encapsulado y estas características se convierte en una buena opción para trabajar como OR-Diodes.

5.4 LEDs del sistema

Tras haber implementado el cargador de baterías, se decidió añadir indicadores de estado luminosos. Para ello se añadieron tres diodos LED, uno de color naranja que está conectado a uno de los pines GPIO del cargador de baterías, y que se iluminará siempre y cuando se este cargando la batería, y se apagará cuando este completamente cargada la batería. Otro diodo LED de color verde que indicará que la conexión USB está correctamente conectada, por lo que se iluminará solo cuando se conecte el módulo vía USB. Y por último un diodo LED de color rojo, que indicará si el módulo está encendido o apagado. De manera que este LED solo brillará en el caso en el que se pulse el botón para encender el módulo.

En la siguiente imagen, se puede ver como quedan conectados los diodos LED a sus respectivas alimentaciones:

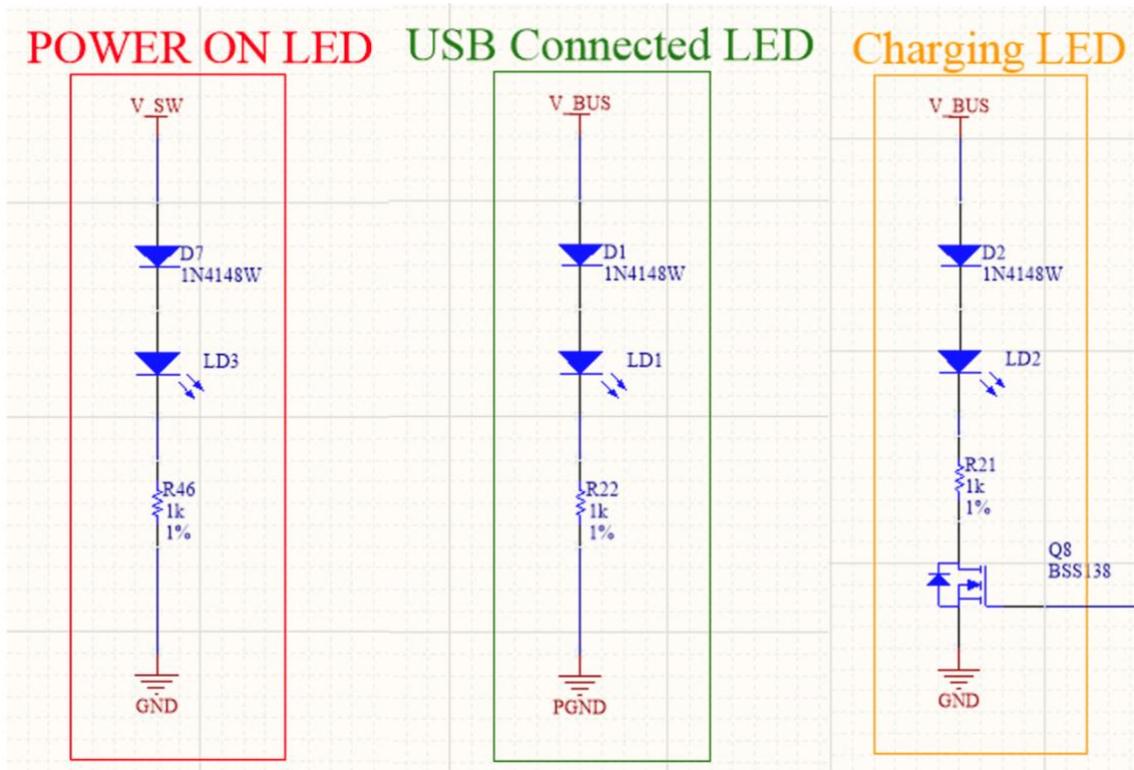


Figura 38. Estado del dispositivo

5.5 Microcontrolador

Como ya se introdujo en capítulos anteriores, el microcontrolador AG15, se trata de un microcontrolador diseñado para la comunicación LTE-V2X en el sector del automóvil. Por lo que cuenta con una gran variedad de interfaces que para nuestra aplicación no son necesarias.

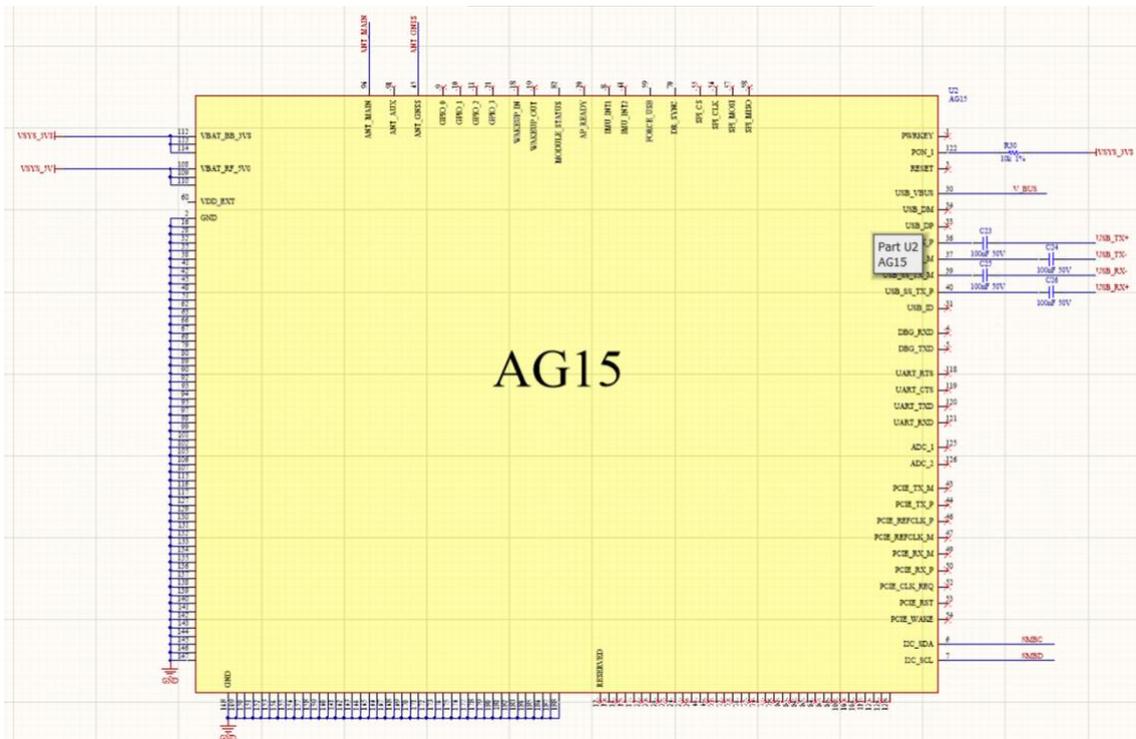


Figura 39. AG15

En nuestra aplicación, únicamente necesitamos la comunicación USB, y la comunicación I2C. Los demás pines que se usan son los de alimentación y los pines dedicados al conexionado de antenas.

Tras consultar el *datasheet* del microcontrolador para consultar que valores de condensadores de desacoplo sugieren. Nos dimos cuenta de que utilizaban varios condensadores en paralelo, además de un diodo de protección contra las descargas ESD, lo que se conoce como un TVS.

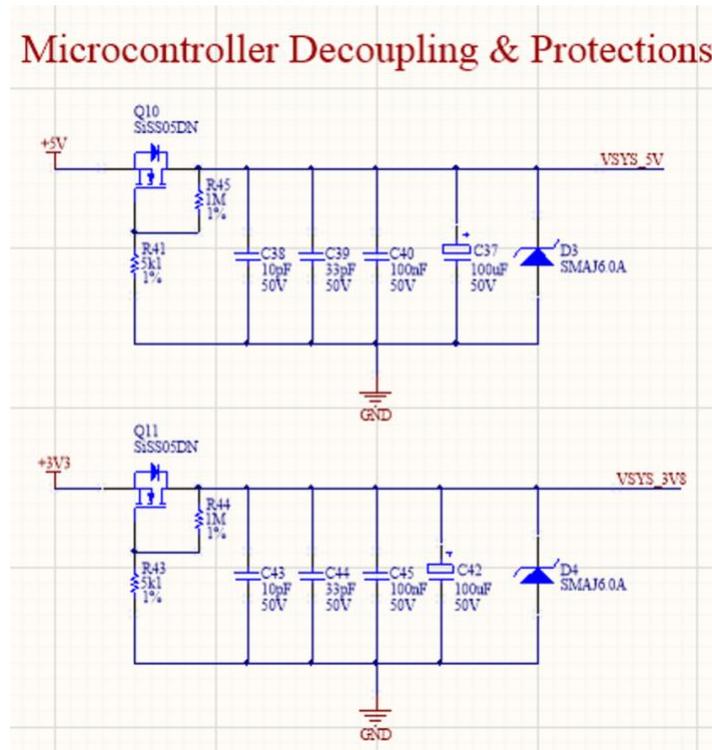


Figura 40. Condensadores de desacoplo y protecciones.

Además, se introdujo un MOSFET a modo de protección frente a una inversión de polaridad en las líneas de alimentación, ya que el microcontrolador es el componente más frágil y a su vez el más caro, por lo que vale la pena proteger dichas líneas.

5.6 Integración de las antenas

Por último, se tratará la integración de las antenas. Para ello se ha de consultar otra vez el *datasheet* del microcontrolador, para ver las configuraciones que sugiere frente al conexionado de antenas. En este caso vemos que añade una serie de componentes para adaptar correctamente la antena de GPS que se vaya a utilizar. Para este conexionado, se ha decidido utilizar un conector UFL, ya que se trata de un conector comercial y bastante sencillo de utilizar.

Para la antena de comunicaciones de 5.9 GHz, no se añade ningún tipo de red de adaptación ya que se presupone que la antena está bien adaptada a la frecuencia de uso y su emplazamiento dentro del circuito impreso debe ser lo más cercano, para evitar añadir pérdidas y por ende desintonizar la antena. En la siguiente imagen se puede ver como quedarían ambas conexiones en el esquemático.

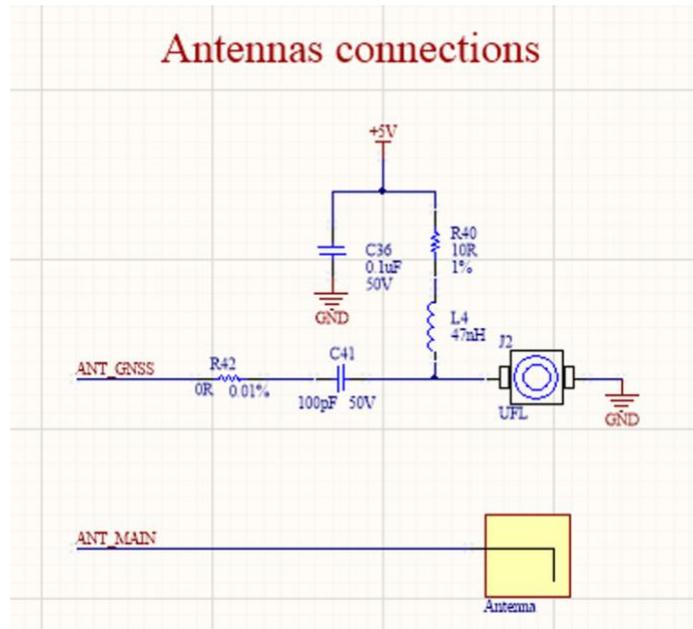


Figura 41. Conexión de antenas.

Capítulo 6. Diseño y simulación de antena de comunicaciones.

En este capítulo se abordará el diseño de la antena de comunicación, utilizada para el módulo de comunicaciones. Para ello se han estudiado diferentes tipos de antenas que podrían encajar con la aplicación.

Una vez realizado el estudio de las diferentes antenas que podrían ser utilizadas en el diseño del módulo, se han realizado simulaciones de las diferentes opciones utilizando el software de diseño y simulación CST Microwave Studio [24].

6.1 Estudio de las posibles soluciones.

Para elegir posibles candidatas para nuestra aplicación se han tenido en cuenta aspectos como el tamaño, la tecnología de fabricación, polarización y coste.

Como ya se ha comentado anteriormente, la localización del módulo y a su vez de la antena de transmisión será en el manillar de la bici, siendo paralela a la carretera. Por lo que precisamos de radiación omnidireccional en el plano XY. Otra ubicación podría ser el sillín de la bicicleta, pero el cuerpo del ciclista apantallaría la antena por lo que se tendría que inclinar el módulo, perdiendo área de transmisión. Otra cuestión es, que en el manillar no sufre apenas impacto estético al colocar el dispositivo, ya que es una zona donde suelen haber accesorios como el cuentakilómetros, y puede ser una posición fácil de incluir en el mercado.

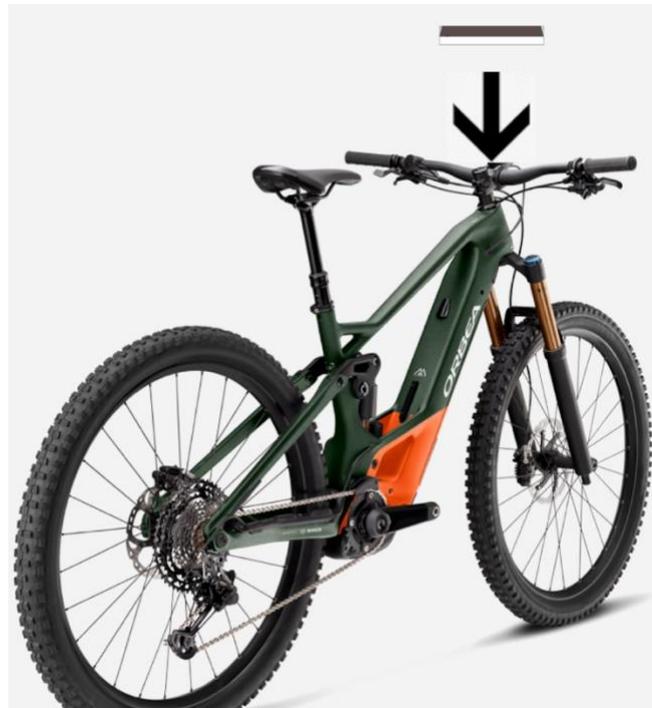


Figura 42. Posicionamiento del módulo de comunicaciones.

Antes de entrar al diseño de las antenas candidatas, se ha de contextualizar el grupo de antenas a tener en cuenta. La futura aplicación se podría englobar en el amplio género de IoT, por lo que vale la pena fijarse en el tipo de antenas utilizados para dispositivos similares. Dichos dispositivos, como podría ser un teléfono móvil o un *Smartwatch*, utilizan antenas que se podrían utilizar en el dispositivo de comunicaciones.



Figura 43. Posicionamiento de antenas en Iphone y Apple Watch. [25]

Las antenas de los teléfonos móviles han sufrido una gran evolución, hasta llegar a las antenas de tamaño reducido que se montan actualmente en los *Smartphones*. Los teléfonos anteriores a los llamados teléfonos inteligentes comenzaron empleando monopolos externos para su antena de comunicación. Con el paso del tiempo, los teléfonos de la primera generación 1G evolucionaron a los teléfonos de 2G, donde se introdujo el gran avance de los SMS y se desarrolló el estándar GSM, que además de permitir una mayor velocidad de transmisión, mejoró la calidad de la voz durante las llamadas. En los teléfonos 2G los monopolos comenzaron a reemplazarse por antenas de tipo impreso que podían integrarse en el interior del terminal.

Tras el desarrollo de los fabricantes de teléfonos móviles y los avances en los diseños de antenas más compactas, se redujo considerablemente el espacio disponible para las antenas en los teléfonos de 3G. El mayor desarrollo en esta generación fue la integración del servicio de Internet en los teléfonos, mediante protocolos IP/TCP-IP. Con este desarrollo la velocidad de transmisión mejoró considerablemente, de manera que la calidad de las llamadas también.

Por último, en la actualidad existen los teléfonos 4G que integran varias antenas de tamaño compacto y funcionamiento MIMO, y como consecuencia permiten velocidades muy elevadas comparables a una fibra óptica.

Como se puede ver en la siguiente imagen, la evolución de los teléfonos se traduce en su tamaño y forma. Los teléfonos de las primeras dos generaciones venían limitados por su el tamaño de su antena y su batería, mientras que los actuales, vienen limitados por el grosor de la batería y el tamaño de la pantalla, ya que estos últimos, a día de hoy, se utilizan para todo, ya que su conexión permite realizar las funciones de un ordenador o un televisor sin ningún tipo de limitación.



Figura 44. Evolución del tamaño de los teléfonos [26].

Cabe recordar que el standard V2X, trata la comunicación a la frecuencia de 5.9 GHz por lo que el tamaño de las antenas es considerablemente más pequeño que a las frecuencias de 2.4 GHz o de 868 MHz, frecuencias utilizadas en aplicaciones móviles mencionadas con anterioridad.

6.1.1 Monopolo

Para empezar a valorar las posibles antenas a emplear en el dispositivo, se considerará la antena más simple desde el punto de vista teórico, el monopolo.

El monopolo es una antena basada en un único brazo cortocircuitado al plano de masa, por lo que se puede afirmar que un monopolo es equivalente a la mitad de un dipolo. El diagrama de radiación de este tipo de antena viene limitado por el plano de masa que este posee, que evita que radie hacia el semiplano inferior. El monopolo tiene un diagrama con forma de toroide, por lo que radia de forma omnidireccional con un nulo de radiación que coincide con el eje del dipolo. Dado su diagrama, es una antena interesante para el dispositivo de comunicaciones, ya que nos permitiría transmitir en todas las direcciones.



Figura 44. Equivalencia entre un Monopolo y un Dipolo aplicando teoría de imágenes [27].

El monopolo resonante típico es el de longitud $\lambda/4$. Como se ha podido ver al inicio del capítulo, en aplicaciones móviles los dispositivos cada vez son más pequeños, por lo que las antenas para dichas aplicaciones han de reducir su tamaño, para ello aparecen antenas como la ILA (*Inverted L Antenna*).

6.1.2 *Inverted L Antenna*

La antena ILA consiste en un monopolo doblado en forma de L, por lo que se mantiene la longitud total del monopolo, pero girándolo de forma paralela al plano de masa para disminuir su altura. La distancia del brazo doblado respecto al plano de masa, marcará la impedancia que presenta la antena. La gran desventaja de esta antena es la baja impedancia que presenta, por lo que no se considera el estudio de dicha antena para el módulo de comunicaciones.

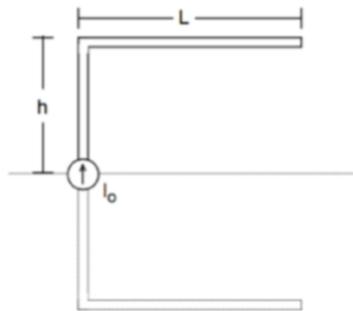


Figura 45. Inverted L Antenna [28].

6.1.3 *Inverted F Antenna*

Tras la ILA se evolucionó a la IFA (*Inverted F Antenna*), que tiene la misma geometría que su antecesora, con la única diferencia de que se le añade un brazo cortocircuitado a masa. La distancia de este brazo respecto al brazo de alimentación permite la adaptación a la impedancia característica a la frecuencia de trabajo, por lo que es mejor que su antecesora. En la siguiente imagen, se puede apreciar la evolución de las antenas. Este tipo de antenas, en versión impresa son las que se usan para la telefonía móvil, y resuenan cuando su longitud total es de aproximadamente $\lambda/4$.

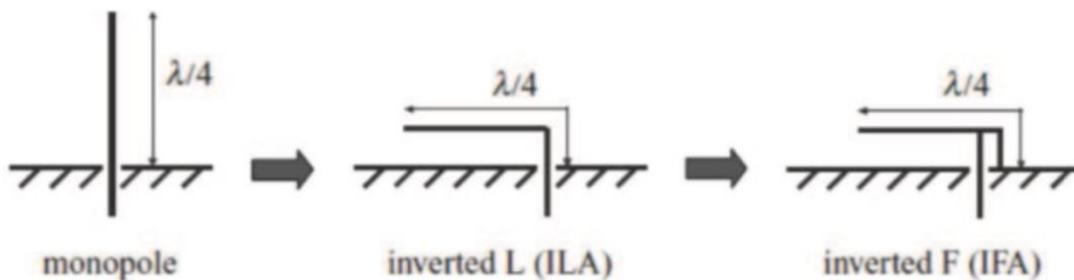


Figura 46. Evolución de las antenas [29].

6.1.4 Printed Inverted F Antenna

Por último, la IFA puede evolucionar en la PIFA (*Printed Inverted F Antenna*), que se trata de una antena con la misma geometría que la anterior, pero en versión impresa, por lo que puede integrarse en el circuito impreso. Esta antena es muy útil debido a que se aprovecha la tecnología *microstrip* para integrarla, por lo que no supone un coste adicional, además de no ocupar tanto volumen como la IFA. La principal desventaja es que para su correcta integración se necesita garantizar una zona libre de cobre, también conocido como *clearance*, tal como se puede ver en la siguiente imagen. Este tipo de antena es de las más comunes, debido al poco espacio que ocupa y lo versátil que puede llegar a ser.

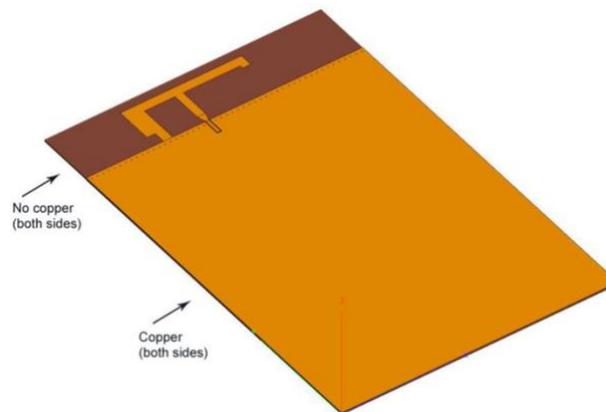


Figura 47. Printed Inverted F Antenna [30].

6.1.5 Patch Antenna

Para finalizar el estudio de las posibles soluciones para la comunicación del dispositivo, cabe resaltar un tipo de antena distinto a los anteriores, ya que se trata de una antena directiva, como son las antenas tipo parche.

Las antenas tipo parche son antenas totalmente directivas, que se fabrican mediante tecnología *microstrip* por lo que son bastante económicas. Su alimentación se puede realizar con una línea *microstrip* conectada a un coaxial. Son antenas que se pueden tratar como un módulo distinto, y se pueden orientar en la dirección en la que se necesite establecer la comunicación, por lo que dan mucha versatilidad. La mayor desventaja de este tipo de antenas es que ocupan una gran superficie, debido a que debe de haber una zona de sin cobre muy amplia, como se puede ver en la siguiente imagen, donde se muestran los parámetros de la antena tipo parche. Por otra parte, las antenas tipo parche resuenan cuando su dimensión está próxima a $\lambda/2$.

Cabe destacar que este tipo de antenas, se suelen alimentar con una línea *microstrip* de impedancia de 50 Ohms a la frecuencia de trabajo. Esta línea *microstrip* se puede conectar a un cable coaxial mediante un conector, por ejemplo, un UFL. Por último, cabe resaltar los pequeños gaps, que aparecen en el parche de la imagen, que permiten que la alimentación llegue al centro del parche y de esta manera obtener una mejor adaptación.

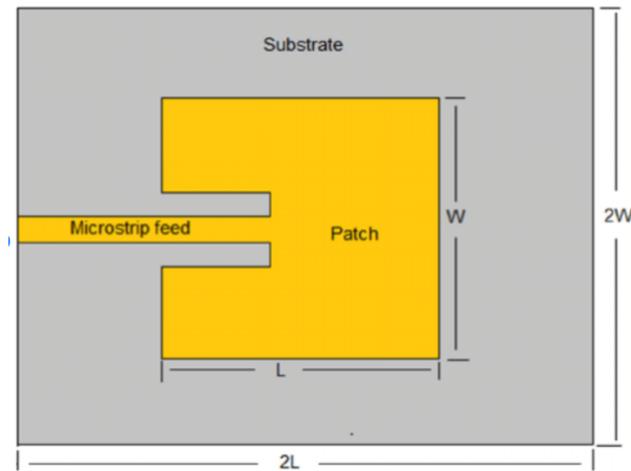


Figura 48. Patch Antena [31].

6.2 Simulación de las antenas propuestas.

En este apartado, se verán los diseños y sus correspondientes simulaciones con el software de diseño CST Microwave Studio, para acabar seleccionando la antena más adecuada para el módulo de comunicaciones. Por lo que se compararán, todos los diseños y se valorarán tanto las ventajas como las desventajas de las distintas opciones.

6.2.1 Monopolo

Para la simulación del monopolo en el software de diseño CST Microwave Studio, hay que definir el sustrato en el que se va a trabajar durante todo el proyecto. Este sustrato se trata del conocido FR-4 de 1.6 mm de grosor, mientras que el cobre de la capa superior y de la capa inferior será de 35 micras.

Por último, la longitud del monopolo es $\lambda/4$ a la frecuencia de 5.9 GHz. Esta longitud se tuvo que recortar un poco pasando de 12.7 mm a 12.5 mm, durante la creación de los elementos para poder ubicar el puerto de alimentación, obligatorio para la simulación. El material del brazo es cobre, y en la práctica el plano de masa se correspondería con la capa superior de cobre del sustrato.

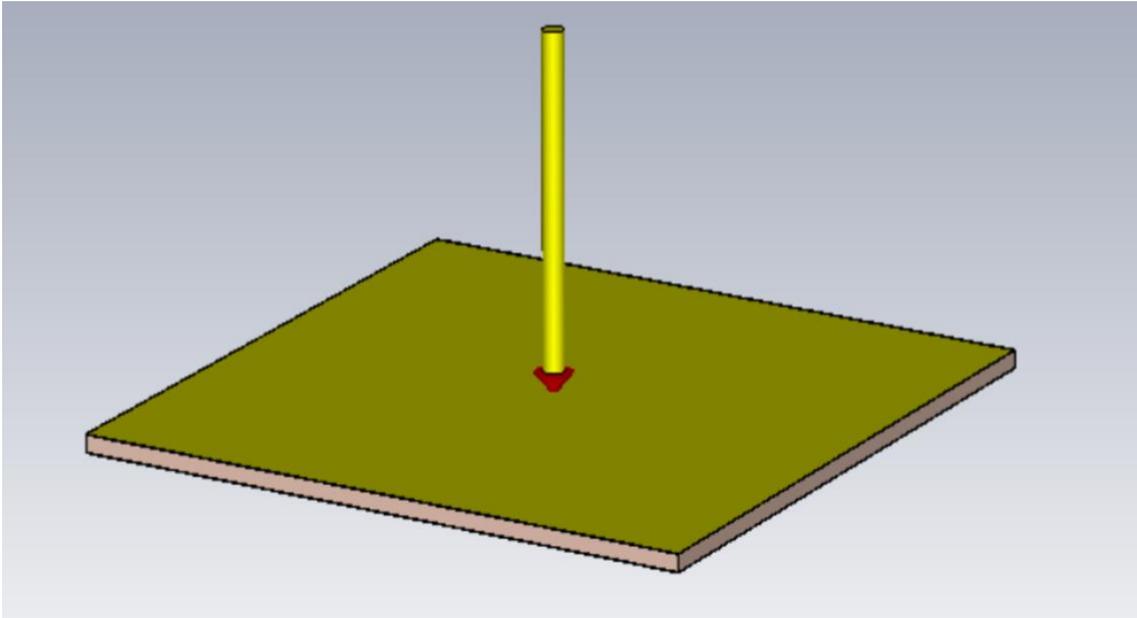


Figura 48. Monopolo modelado en CST.

Analizando los resultados obtenidos para el parámetro S_{11} tras la simulación, se puede ver en la siguiente imagen que se tiene una antena cuya frecuencia central está cerca de los 5.9 GHz deseados (valor mínimo del S_{11}). Además, podemos observar que se tiene un ancho de banda de un 10.33% para una referencia de $S_{11} < -10\text{dB}$, ya que la frecuencia inferior es 5.59 GHz y la frecuencia superior es 6.2 GHz.

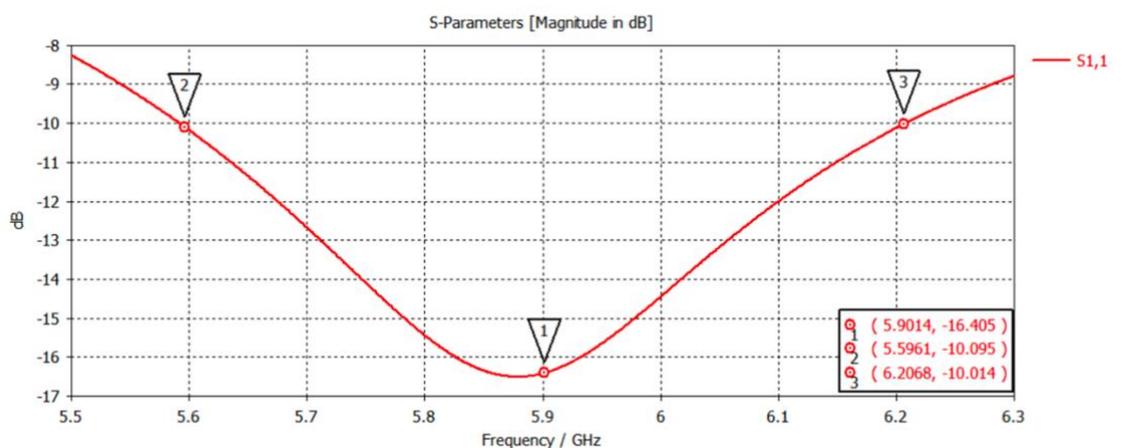


Figura 49. Parámetros S_{11} del Monopolo.

Analizando los resultados del diagrama de radiación de la antena, se puede determinar que se trata de una antena omnidireccional, que presenta un nulo en la dirección del eje Y (eje del dipolo), como era de esperar.

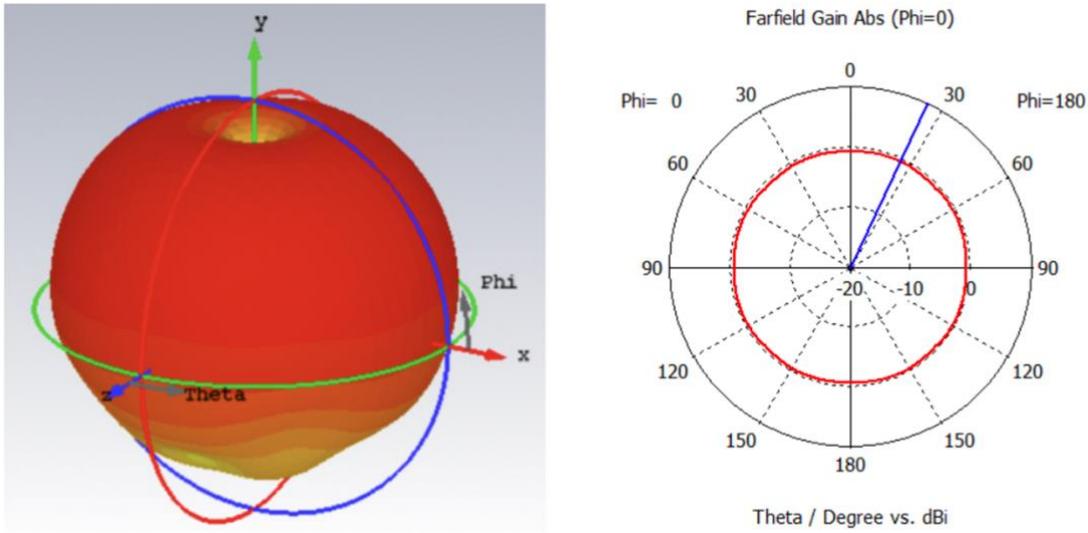


Figura 50. Diagrama de radiación 3D (izquierda). Corte plano XZ (derecha).

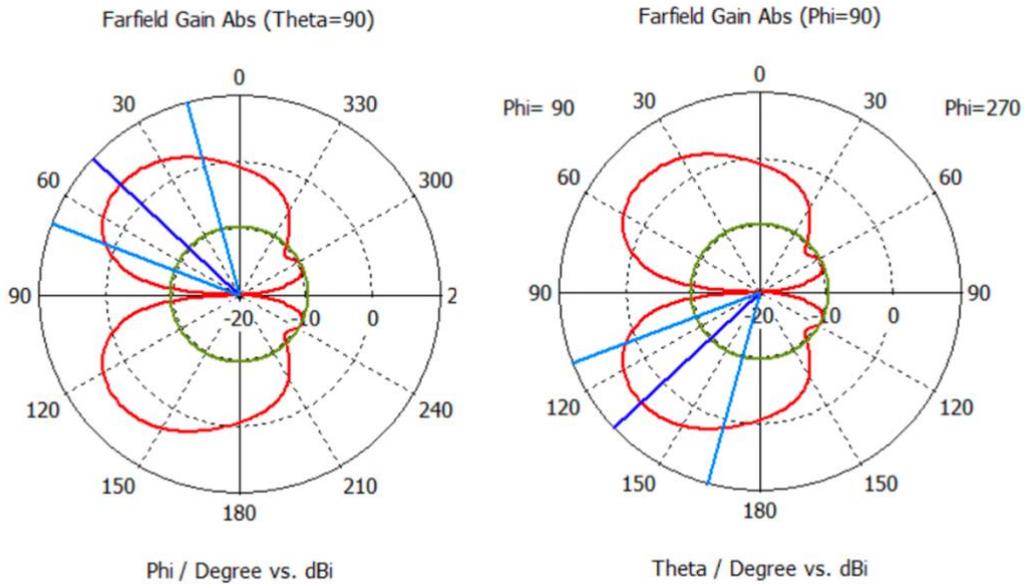


Figura 51. Corte plano eje XY (izquierda). Corte plano YZ (derecha).

6.2.2 *Inverted F Antenna*

Para la simulación de la antena IFA, se ha definido el tamaño de la PCB de 10x10 cm. El espesor del sustrato es 1.6mm y el del cobre de las capas superior e inferior es de 35 micras.

Como se puede ver en la siguiente imagen, la antena se ha colocado en el extremo izquierdo superior de la PCB, por el simple hecho de comparar en igualdad de condiciones los datos con las siguientes antenas. Este tipo de antena no necesita ningún tipo de *clearance*, por lo que es más sencilla para realizar el enrutado de la PCB. Por el contrario, al no tratarse de una antena impresa, se utiliza otro proceso de fabricación lo que significa un aumento de precio y de tiempo. La altura de la antena es de 4.7 mm, mientras que su separación entre el brazo cortocircuitado y la alimentación es de 5.72 mm. Por último, el tamaño total del brazo es de 15 mm.

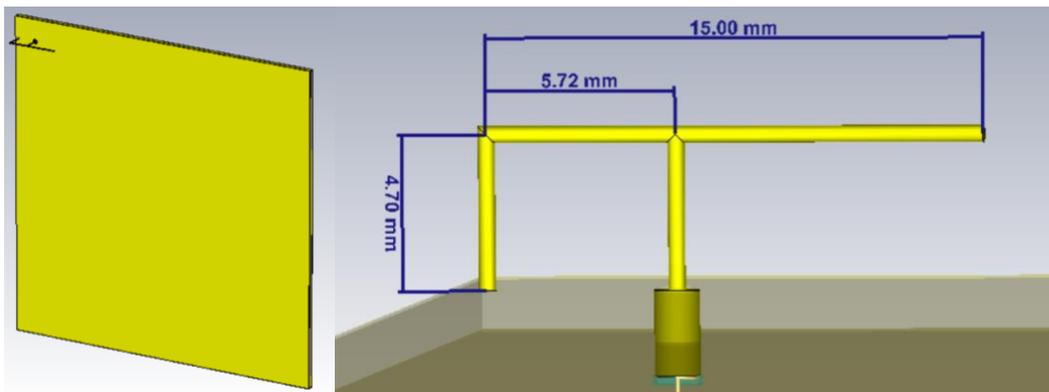


Figura 52. IFA modelada en CST.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen, en la que se presenta el parámetro S_{11} , se trata de una antena cuya frecuencia central de trabajo es 5.9 GHz, con un ancho de banda de 8.13% tomando -10 dB como referencia, ya que su frecuencia inferior es de 5.66GHz y su frecuencia superior de 6.14GHz.

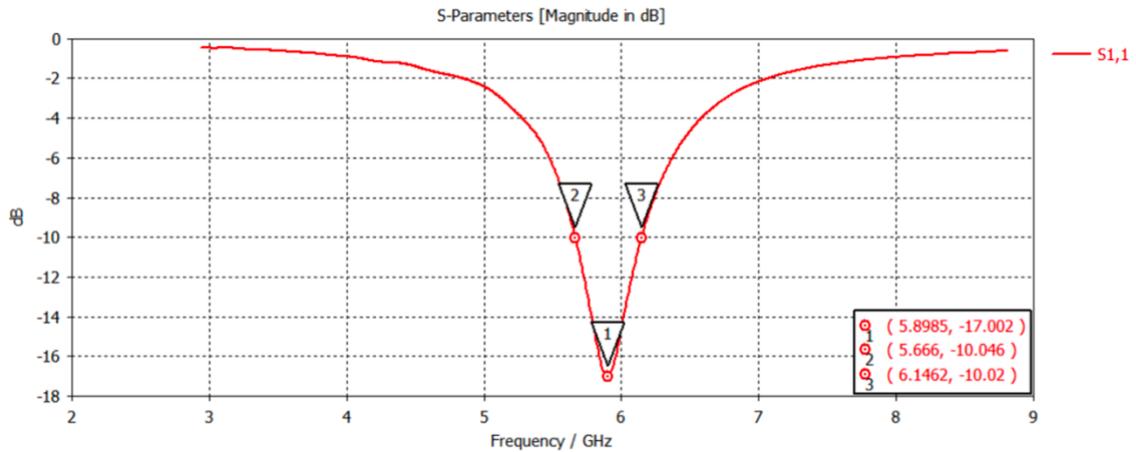


Figura 53. Parámetro S_{11} de la antena IFA.

Como se ve en su diagrama de radiación, se trata de una antena totalmente omnidireccional, pero se pueden apreciar una especie de granulaciones o irregularidades, debidas a la aparición de otros modos de radiación de orden superior que se excitan al mismo tiempo que el modo fundamental.

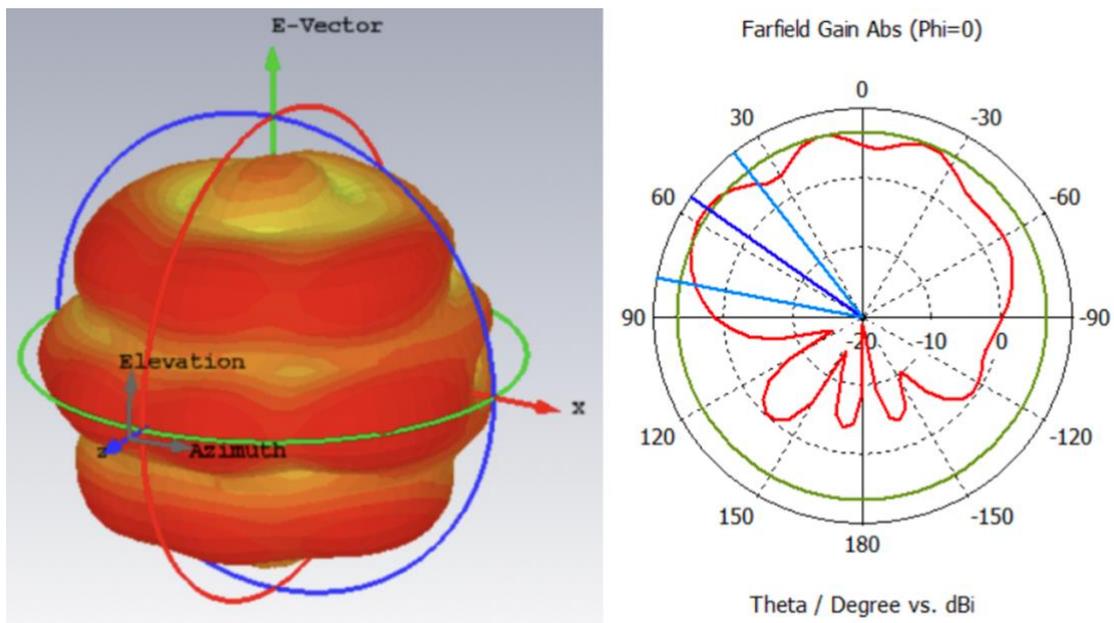


Figura 54. Diagrama de radiación 3D (izquierda). Corte plano XZ (derecha).

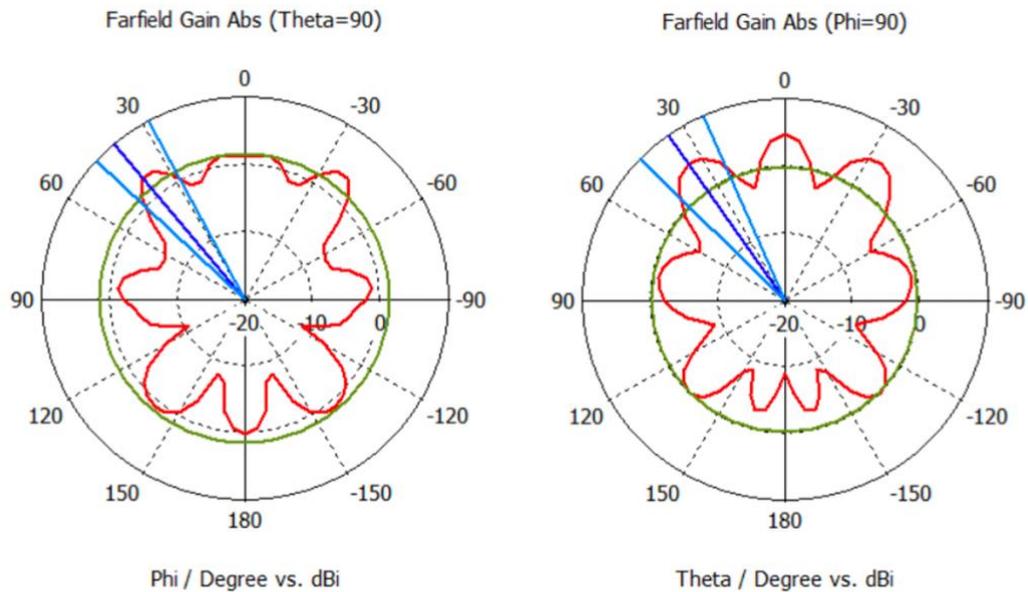


Figura 55. Corte plano XY (derecha). Corte plano YZ (izquierda).

6.2.3 Printed Inverted F Antenna

Siguiendo con la metodología de simulación durante el proyecto, para este caso se ha ubicado la antena impresa en la misma posición que su antecesora, ya que ambas antenas son del mismo tipo y es la mejor manera de compararlas. Al igual que la simulación anterior, se ha modelizado la PCB como un cuadrado de 10x10cm de sustrato FR-4, con grosor de 1.6mm y 35 micras de grosor de cobre.

Por último, cabe destacar que para conseguir que la adaptación a 50 Ohms a la frecuencia central de trabajo, se ha de variar la distancia del brazo de alimentación, frente al brazo cortocircuitado.

A diferencia de la antena IFA, esta antena requiere una zona de *clearance* tanto en la capa superior como en la capa inferior. Por lo que se trata de una restricción de cara al diseño del *layout*, ya que limita el espacio donde situar componentes.

El brazo de la antena tiene una longitud de 12.69 mm de largo y 3.36 mm de ancho, calculados con la herramienta de cálculo *microstrip* EMTALK [36]. Su brazo cortocircuitado tiene una anchura de 1.34 mm por 1.2 de largo y su alimentación tiene una anchura de 1.34 mm por 0.5 mm de largo.

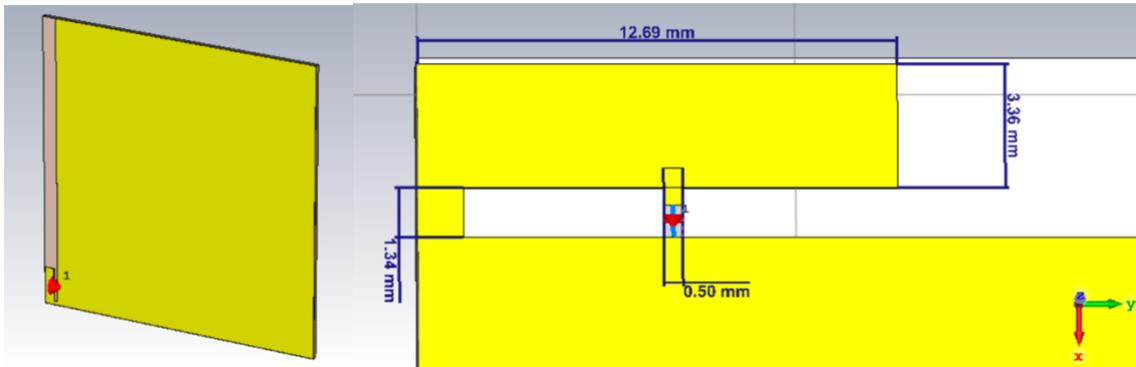


Figura 56. PIFA antenna modelada en CST.

Como se puede ver en la siguiente imagen, se trata de una antena con un amplio ancho de banda de 32.8 %, ya que su frecuencia más baja es 4.14 GHz y su frecuencia superior es de 6.08 GHz para una referencia de -10 dB. Por tanto, la banda de operación se encuentra dentro de la frecuencia de uso del módulo de comunicaciones a diseñar.

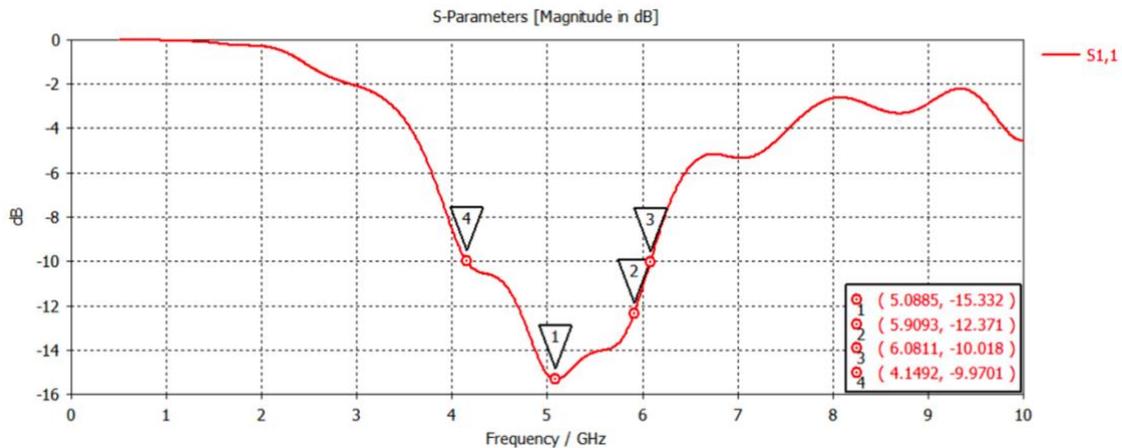


Figura 57. Parámetros S_{11} de la PIFA.

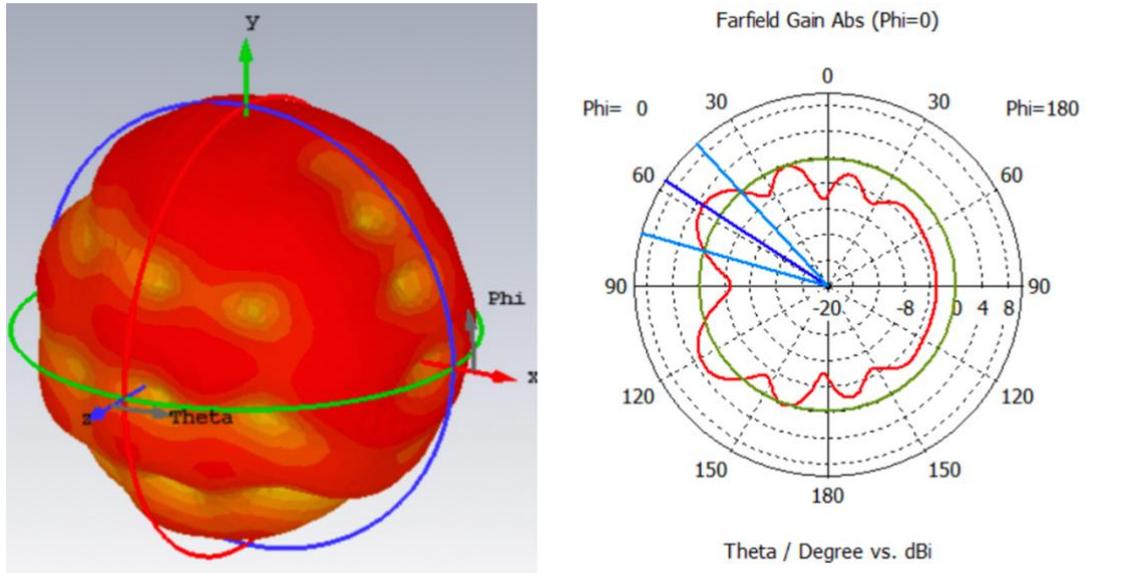


Figura 57. Diagrama de radiación 3D (izquierda). Corte plano XZ (derecha).

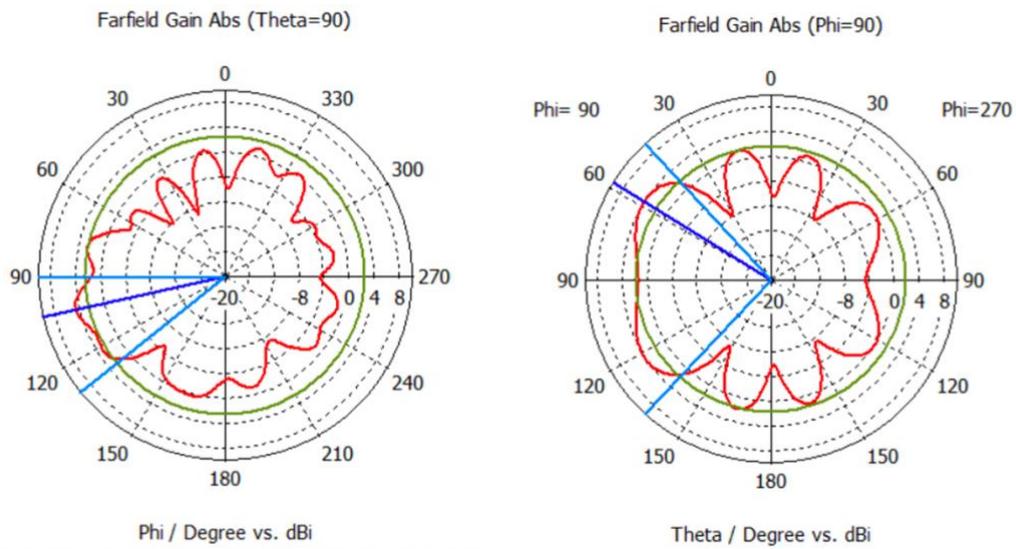


Figura 58. Corte plano en el eje XY (izquierda). Corte plano YZ (derecha).

6.2.4 Patch Antenna

La última antena para diseñar se trata de la antena de parche. Para poder realizar la simulación de esta antena en el software de diseño CST Microwave Studio, se ha realizado un parche de cobre de dimensiones $L \times W$. Donde L y W vienen de las siguientes ecuaciones:

$$L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_r}} = 15 \text{ mm} \quad (6.1)$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = 12 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Donde:

- $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$
- $\epsilon_r = 4.3$
- $f_r = 5.9 \text{ GHz}$

El parche necesita una superficie libre de cobre que tiene las dimensiones de $2L \times 2W$. Además, para excitar el parche se utiliza una línea *microstrip* de 50 Ohmios a la frecuencia 5.9 GHz.

Por último, aparecen unos gaps en el parche, que se utilizan para llevar la alimentación al centro del parche y mejorar de esta manera su adaptación.

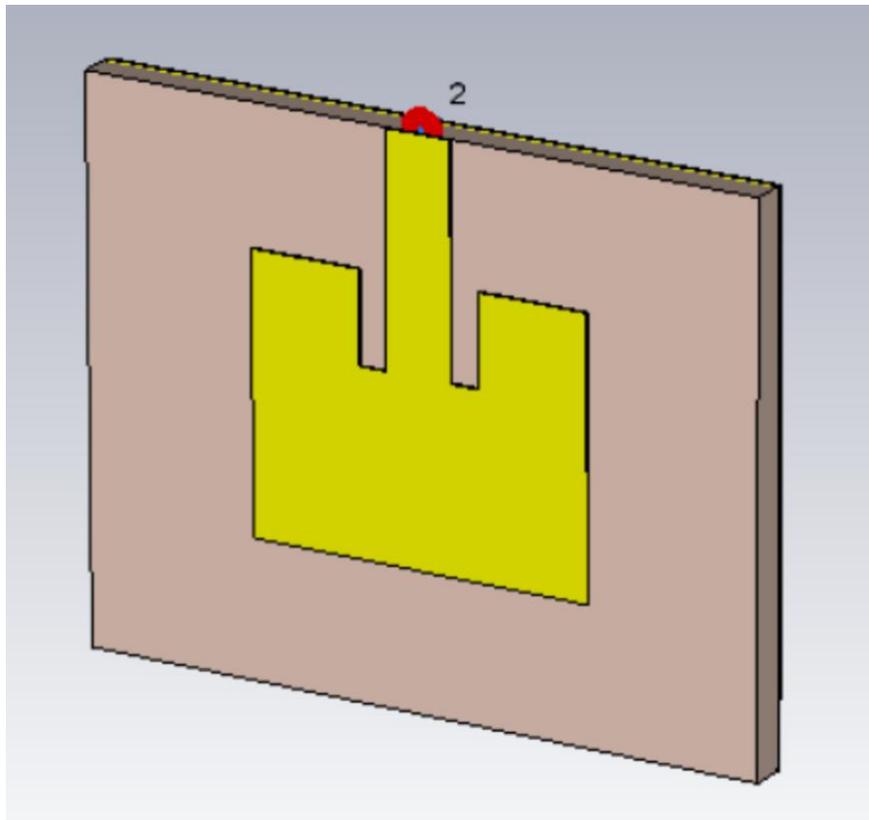


Figura 59. PATCH antenna modelada en CST.

Como se puede apreciar en la representación del parámetro S_{11} , se trata de una antena con un ancho de banda de 5.59 %, ya que su frecuencia inferior es de 5.6 GHz y su frecuencia superior es de 5.98 GHz para una referencia de -10 dB.

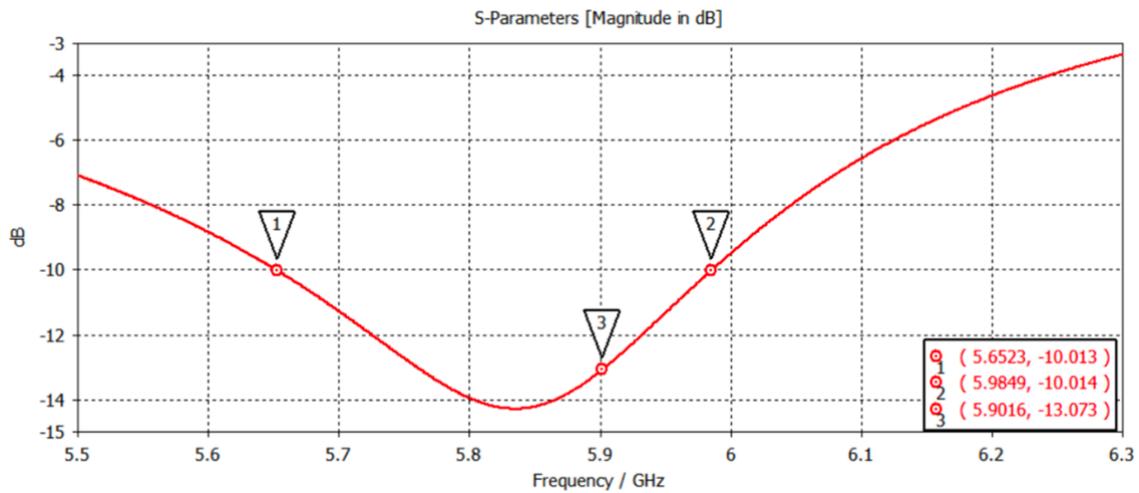


Figura 60. Parámetro S_{11} de antena PATCH.

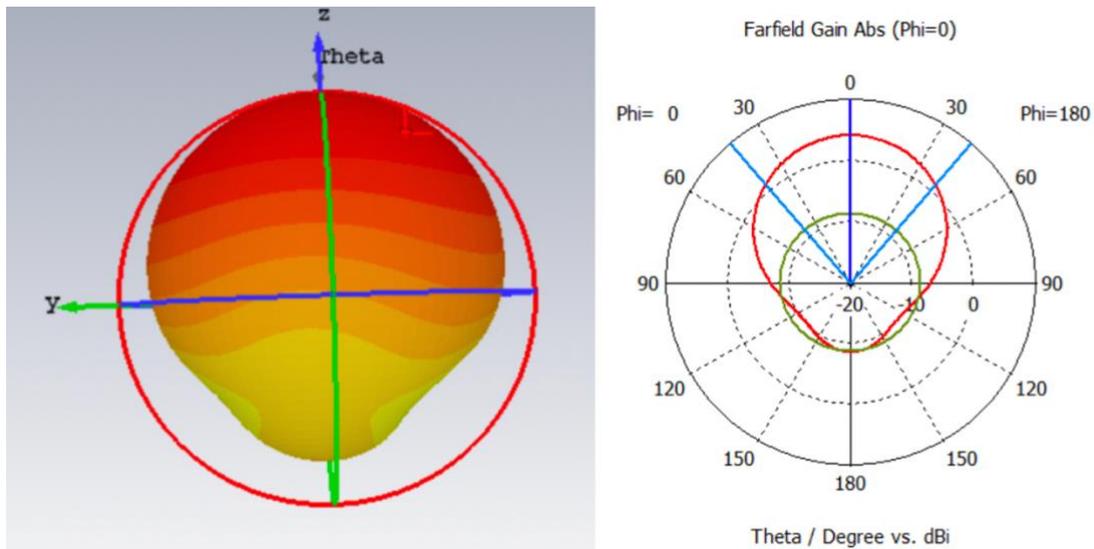


Figura 61. Diagrama de radiación 3D(izquierda). Corte plano XZ (derecha).

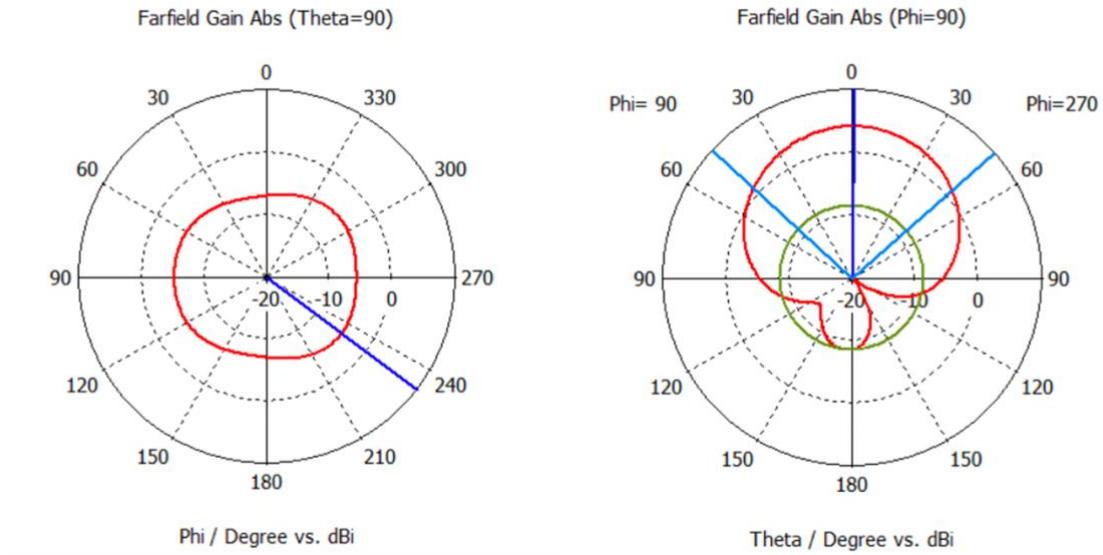


Figura 62. Corte plano eje XY (izquierda). Corte plano YZ (derecha).



6.3 Selección de antena final.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los principales parámetros de los diseños simulados en el apartado anterior.

Tipo	Tipo de radiación	Frecuencia mín.	Frecuencia máx.	BW(%)
Monopolo	Omnidireccional	5.59 GHz	6.2 GHz	10.33%
Patch	Directiva	5.65 GHz	5.98 GHz	5.59%
PIFA	Omnidireccional	4.14 GHz	6.08 GHz	32.8%
IFA	Omnidireccional	5.66 GHz	6.15 GHz	8.13%

Tabla 5. Comparación entre antenas.

Tras las simulaciones obtenidas en el apartado anterior, se puede apreciar que la antena de tipo parche es la que menor ancho de banda presenta frente a las otras antenas. Esta antena se va a descartar ya que el objetivo de esta aplicación es poder transmitir en todas las direcciones, por lo que, para realizar dicha comunicación con una antena directiva, deberíamos utilizar una antena en la parte frontal de la bicicleta y otra en la parte trasera, por lo que esta opción queda en una posible solución para líneas futuras de investigación.

Respecto al monopolo, a pesar de tener buen ancho de banda y comportamiento omnidireccional, también se ha de descartar, ya que su fabricación impactaría de forma visual en la estética del módulo de comunicaciones, además de que tendría un coste mayor de las demás soluciones. Por lo que se ha de elegir entre la antena IFA y la antena PIFA.

Para realizar esta selección, se ha decidido simular el impacto de la caja de plástico o *housing* donde iría encerrado el módulo de comunicaciones.

6.3.1 Influencia del plástico en la antena IFA

Como se puede ver en la siguiente imagen, se ha recubierto la PCB y la antena con plástico ABS, para poder ver la influencia que tendría encapsular el módulo.

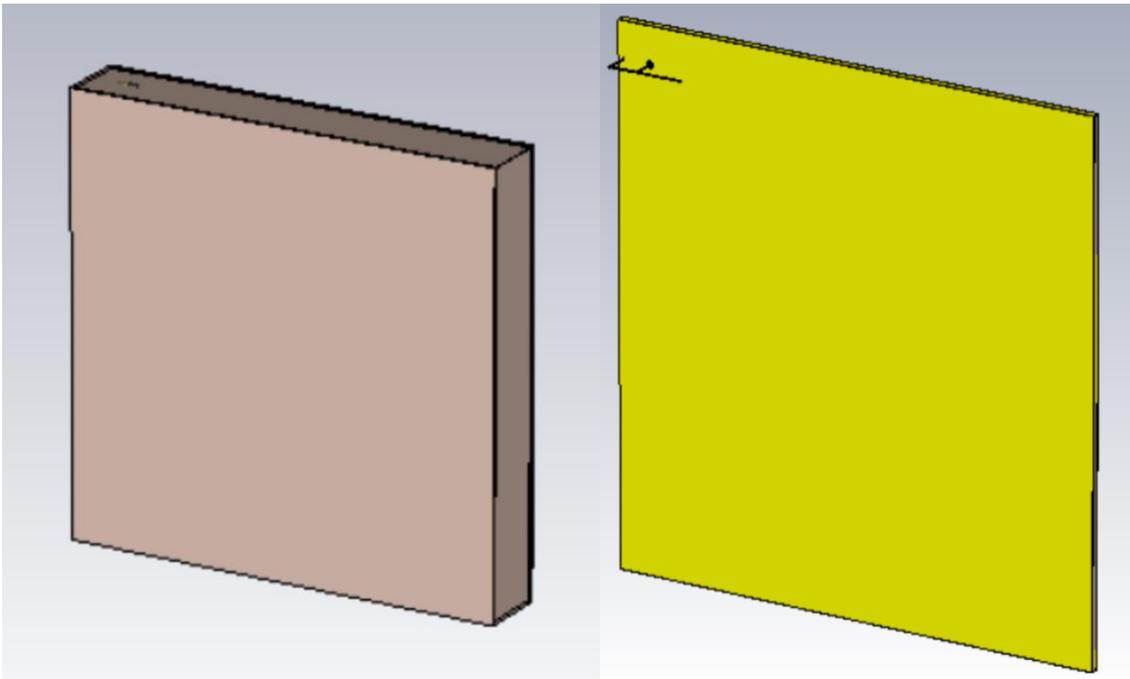


Figura 63. IFA con carcasa de ABS.

Analizando la simulación con el plástico, se puede apreciar que la antena se desplaza en frecuencia y ya no está centrada en 5.9 GHz como lo estaba en el apartado anterior. Por lo que se ha decidido modificar la distancia del brazo de alimentación respecto al brazo cortocircuitado a tierra. Obteniendo de esta manera otra vez la frecuencia central en 5.9 GHz. Como se puede ver en la siguiente imagen, la variación ha sido muy leve, y la distancia óptima es de 14.73 mm.

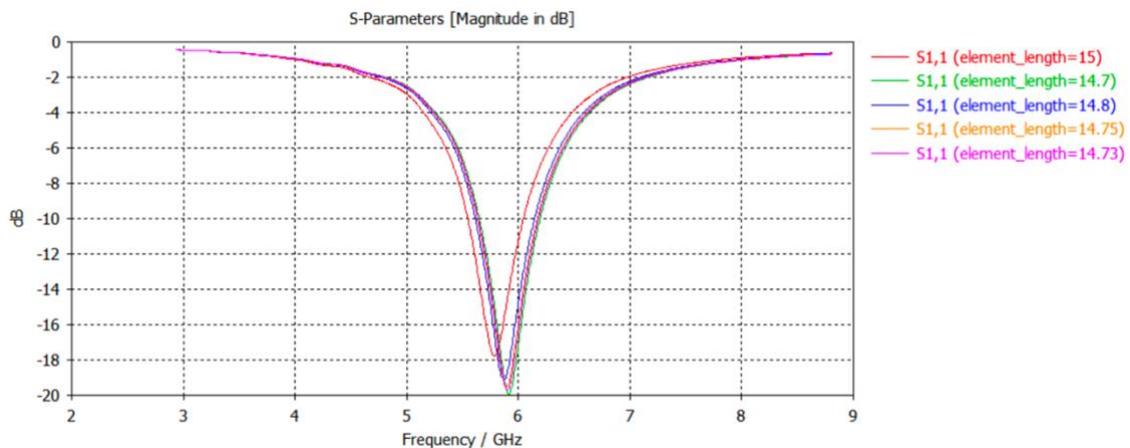


Figura 64. Influencia del ABS en el parámetro S₁₁ de la IFA.

Respecto a la ganancia, se puede apreciar que la influencia del plástico para el diseño inicial ha sido positiva, ya que se ha conseguido una mejor adaptación y como consecuencia su ganancia ha mejorado respecto al diseño ideal.

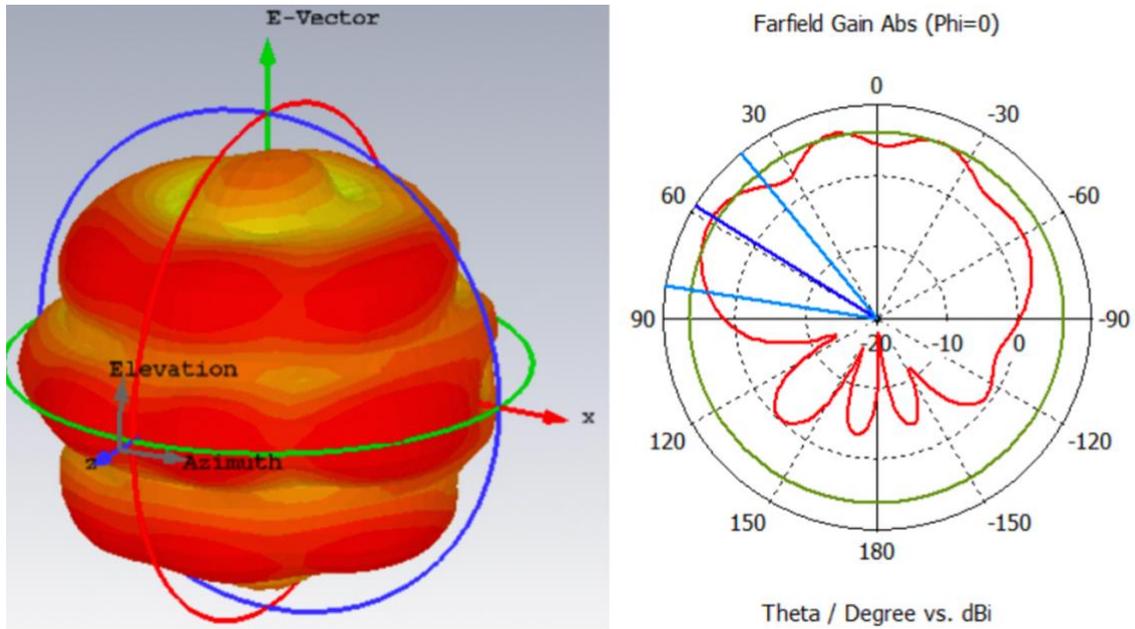


Figura 65. Diagrama de radiación 3D (izquierda). Corte plano XZ (derecha).

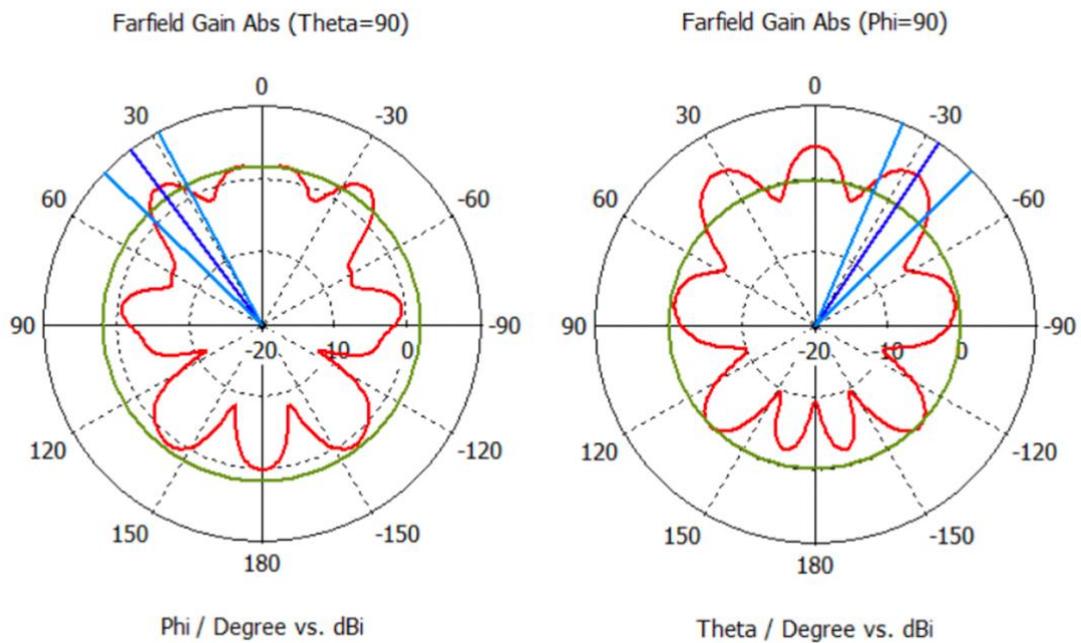


Figura 66. Corte plano XY (izquierda). Corte plano YZ (derecha).

6.3.2 Influencia del plástico en la antena PIFA

Al igual que el apartado anterior, se ha realizado una simulación del plástico ABS, con las mismas dimensiones que el apartado anterior, para poder realizar una correcta comparación de resultados, quedando de la siguiente manera.

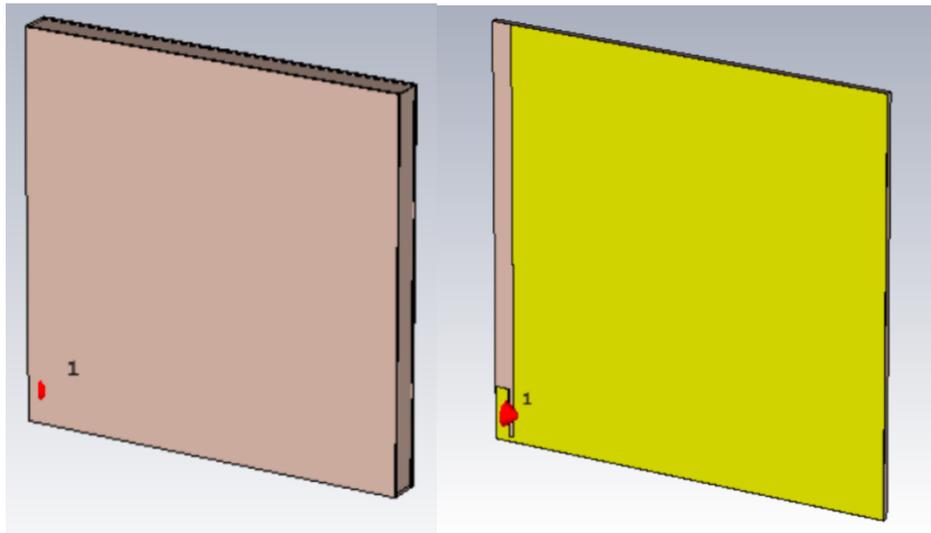


Figura 67. Antena PIFA con carcasa de ABS.

Como se puede apreciar, la curva del parámetro S_{11} se ha desplazado, pero sigue estando dentro de su ancho de banda la frecuencia de trabajo, 5.9 GHz por lo que no es necesario optimizar la antena para la frecuencia de trabajo.

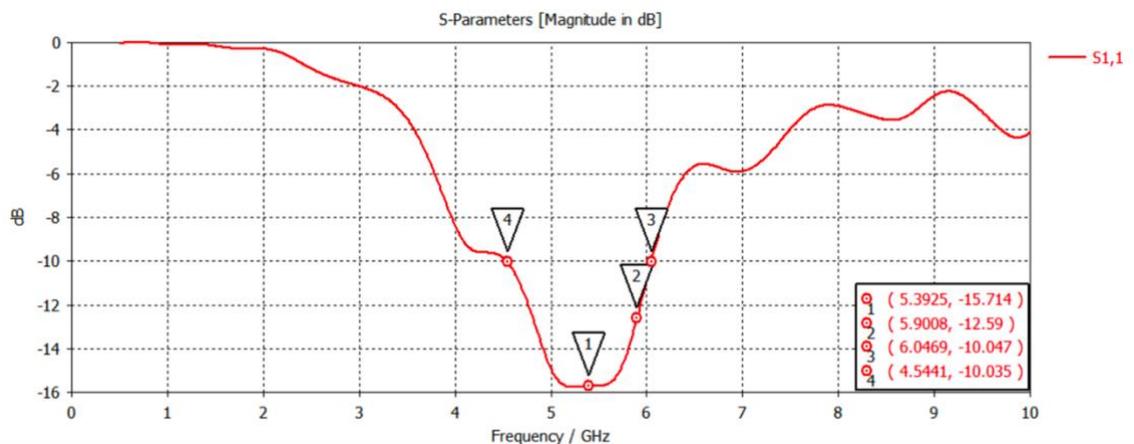


Figura 68. Influencia del ABS en el S_{11} de la PIFA.

Al igual que el diseño anterior, la influencia del plástico ha sido positiva para nuestra antena, y esto se traduce en una mejoría de la ganancia de la antena.

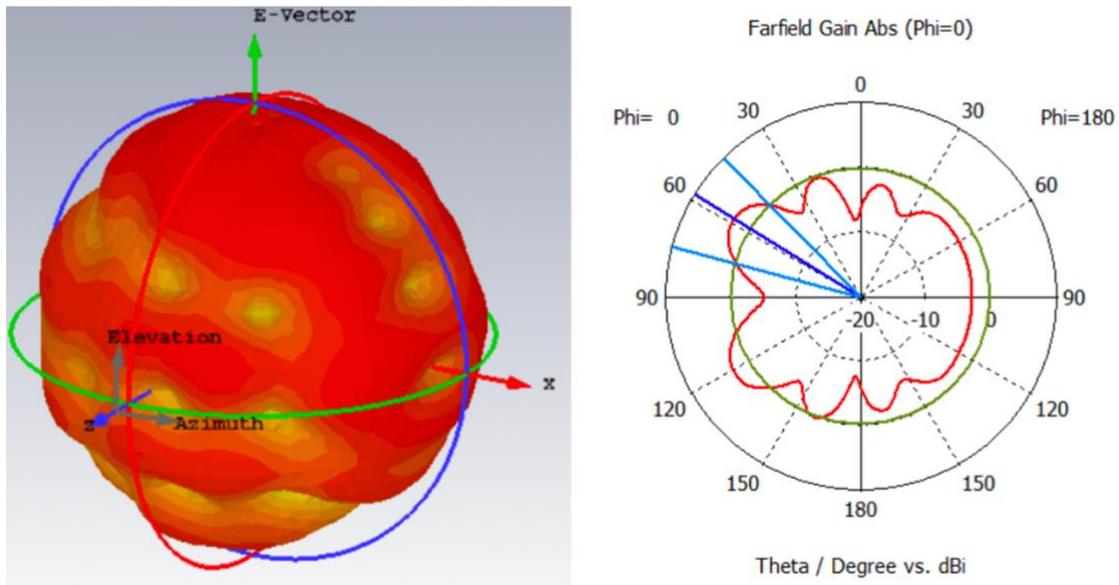


Figura 69. Diagrama de radiación (izquierda). Corte plano XZ (derecha).

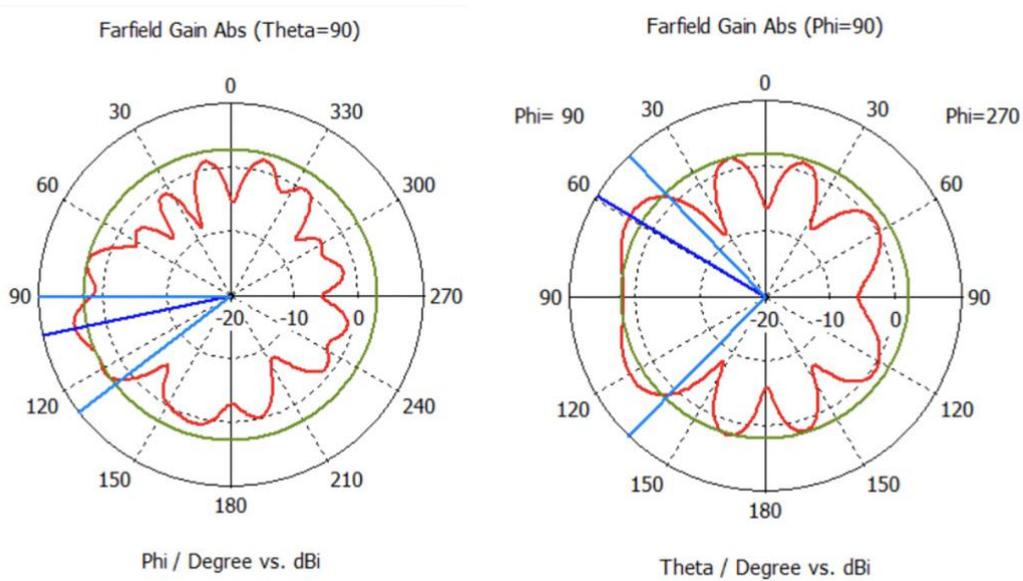


Figura 70. Corte plano XY (izquierda). Corte plano YZ (derecha).

6.3.3 Selección de antena final

Una vez visto el impacto de los plásticos en los resultados de las simulaciones, es hora de seleccionar cuál va a ser la antena seleccionada para el diseño del módulo. Para ello al igual que en el apartado anterior se ha hecho una tabla comparativa, donde se ha tenido en cuenta el ancho de banda, la ganancia y la tecnología de fabricación.

Tipo	Frecuencia mín.	Frecuencia máx.	BW(%)	Tecnología Adicional
PIFA	5.39 GHz	6.04 GHz	32.8%	No
IFA	5.66 GHz	6.15 GHz	8.13%	Sí

Tabla 6. Comparación entre antenas con carcasa.

Tras analizar los datos de las simulaciones, queda claro que la mejor opción es la de la PIFA, ya que tiene un mayor ancho de banda y una ganancia mayor. Además, no requiere de ninguna tecnología de fabricación adicional, por lo que se trata de una antena más económica que la IFA. Por último, esta antena requiere un sacrificio de espacio en el enrutado de la PCB, pero ya que se tiene una superficie de cobre lo suficientemente grande como para poder emplazar todos los componentes, no supondrá ningún tipo de problema.

6.4 Antena GPS

Para concluir el capítulo de diseño de antenas, se ha de decidir que antena GPS montar para poder transmitir la posición GPS del ciclista, para evitar accidentes.

Se ha decidido que la antena GPS para la aplicación no se diseñe como las antenas anteriores, ya que se trata de una aplicación común, por lo que los diferentes fabricantes de componentes pueden garantizar diversidad de posibilidades óptimas.

Otro de los factores que han llevado a descartar el diseño de dicha antena, es el tamaño que está tendría respecto a las posibilidades en el mercado, que al ser antenas montadas en su propia PCB, son capaces de alcanzar tamaños muy reducidos, perfectos para aplicaciones portátiles. Empresas como Taoglas, Pulse Electronics, Pulse Larsen Antennas o Johanson, son ejemplos de las soluciones del mercado.

Para el dispositivo se ha hecho una búsqueda en los principales distribuidores, como Farnell, Mouser, Digikey o RS, para seleccionar la solución óptima. Para ello se han tenido en cuenta características como el tamaño, si es adhesiva o no, y la ganancia de esta.

Se ha seleccionado la antena de la empresa Pulse Larsen Antennas con *manufacturer part number* GPSMOD1333 [32]. Dicha antena tiene un tamaño de 13x13mm y una ganancia máxima de 33dB, por lo que en la relación tamaño-ganancia es la mejor que se ha encontrado en el mercado.



Figura 72. Antena GPS GPSMOD1333 [32].

Se trata de una antena pensada para aplicaciones como automóviles y tracking y posicionamiento. Esta pensada para ensamblar mediante el adhesivo dentro del dispositivo, además viene alimentada por un cable coaxial con terminación UFL hembra. A continuación, se puede ver una tabla comparativa entre las antenas para la misma aplicación de la empresa Pulse Larsen Antennas:

	GPSMOD1315	GPSMOD1333	GPSMOD2515	GPSMOD2533
ELECTRICAL SPECIFICATIONS				
FREQUENCY	1575.42mhz	1575.42mhz	1575.42mhz	1575.42mhz
NOMINAL IMPEDANCE (Ω)	50	50	50	50
VSWR	1.5:1	1.5:1	1.5:1	1.5:1
GAIN RADIATING ELEMENT	-1dBic +/- 1 dB	-1dBic +/- 1 dB	3.4dBic +/- 1 dB	3.4dBic +/- 1 dB
GAIN LNA	16 dB +/- 1 dB	33 dB +/- 2 dB	16 dB +/- 1 dB	33 dB +/- 2 dB
LNA NOISE FIGURE	< 2.4 dB	< 2.4 dB	< 2.6 dB	< 3.4 dB
POLARIZATION	RCHP	RCHP	RCHP	RCHP
OPERATING VOLTAGE	3.3-5 Vdc +/- 0.5 V	3.3-5 Vdc +/- 0.5 V	3.3-5 Vdc +/- 0.5 V	3.3-5 Vdc +/- 0.5 V
CURRENT COMSUMPTION	< 6A mA	< 10A mA	< 6A mA	< 10A mA

Tabla 7. Especificaciones antena GPS [32].

Por último, cabe hacer mención, para seguir con la línea del proyecto, a los cortes del diagrama de radiación de la antena GPS en los planos Z-X y Z-Y. Esta información se extrae del *datasheet* de la antena GPSMOD1333.

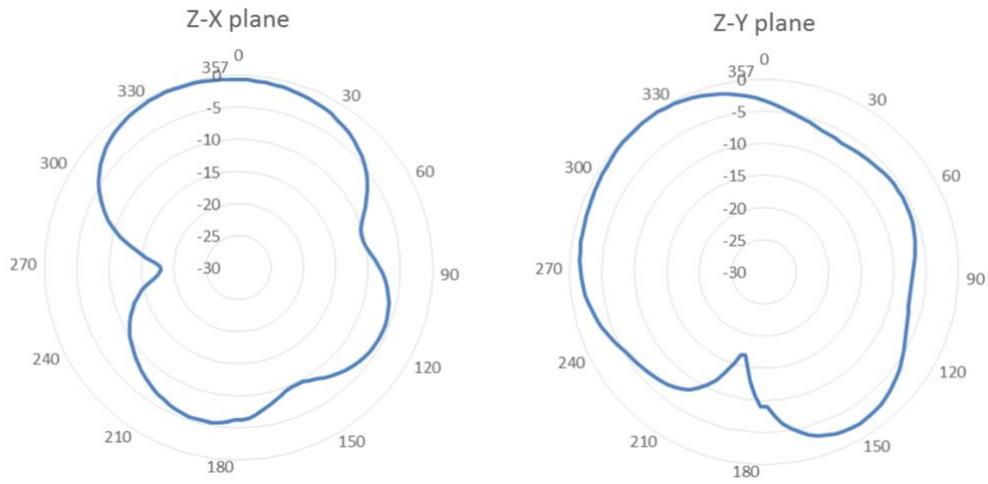


Figura 72. Corte plano Z-X (izquierda). Corte plano Z-Y (derecha) [32].



Capítulo 7. Diseño de circuito impreso.

Una vez se ha terminado el diseño del esquemático electrónico del proyecto, el siguiente paso es realizar el conexionado del circuito impreso o lo que se conoce como *layout*.

Para la realización del *layout*, hay que crear un *footprint* para cada componente haciendo caso a la información que aparece en los *datasheets* de los fabricantes. Además, dependiendo de la empresa que se encargue del montaje de los componentes, se definen una serie de reglas para garantizar el correcto montaje del circuito impreso. Por ejemplo, en Celestica se crea una capa de seguridad para evitar colisiones de las máquinas de posicionamiento de componentes, llamadas *pick and place*.

Con todos los componentes con su respectivo *footprint* asignado, el siguiente paso es definir el *stackup* de la PCB, que será una guía para el fabricante de PCBs, y en el caso de que no pueda fabricar las dimensiones marcadas, propondrá unas dimensiones similares alcanzables por sus tecnologías de fabricación.

El siguiente paso por realizar se trata de lo que se conoce como *placement*, se trata del posicionamiento de los componentes en función de los esquemáticos, para asegurar que todos los componentes pueden encajar con el espacio definido para el circuito impreso. Tras la revisión de este emplazamiento de componentes, se empezará el conexionado de componentes con sus correspondientes conexiones. Antes de ello, es aconsejable estudiar cuál va a ser la corriente máxima que va a circular por las *nets*, de esta manera se podrá calcular el grosor de estas de manera que el incremento térmico sea menor a 10 °C. En este proyecto la corriente máxima que pasará se trata de la corriente de carga, y debido al *datasheet* del fabricante de la batería, se sabe que para una carga segura la corriente no podrá ser mayor a 0.5 A.

Para el cálculo del grosor de las pistas existen una serie de fórmulas marcadas por el IPC-2221 [39], que el blog TheCircuitCalculator.com [33] se encargó de plasmar en una aplicación en javascript.



Current	0.5	Amps
Thickness	1.6	mm

Optional Inputs:

Temperature Rise	10	Deg C
Ambient Temperature	25	Deg C
Trace Length	1	inch

Results for Internal Layers:

Required Trace Width	0.00657	mm
Resistance	0.0427	Ohms
Voltage Drop	0.0213	Volts
Power Loss	0.0107	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	0.00253	mm
Resistance	0.111	Ohms
Voltage Drop	0.0555	Volts
Power Loss	0.0278	Watts

Figura 74. Calculadora de ancho de pista [33].

Tras calcular el ancho de pista mínimo necesario para no tener un calentamiento excesivo que pueda dañar componentes con la corriente de carga, se ha de calcular el tamaño de la vía que se usará para evitar sobrecalentamientos. Para ello se utilizará el software Saturn PCB Toolkit [34], el cuál te permite obtener datos de como se comportaría una vía en función de su tamaño. En este caso se puede apreciar, que esta vía tiene un diámetro de taladro de 0.2 mm y un diámetro de pad de 0.5 mm. Con estos datos se ve que pueden pasar hasta 2 A por lo que es perfecta para el diseño del proyecto.

Figura 75. Calculadora del tamaño de vía [34].

Una vez se tiene el tamaño de las vías y el ancho de pista necesario para la aplicación, se empezará el trazado de pistas.

Teniendo en cuenta los esquemáticos, se ha decidido separar el cargador de baterías del microcontrolador y la antena, para evitar que posibles ruidos provocados por la conmutación del convertidor puedan acoplarse a los buses de comunicación.

En la capa superior, se ha decidido emplazar la antena, el microcontrolador lo más cerca posible de la antena, el conector UFL para conectar la antena GPS. Este conector tiene una restricción que se trata de no tener cobre debajo por eso se puede apreciar un hueco en el plano de masa.

Por temas estéticos, se ha decidido montar el botón y los leds en la capa Top, ya que se trata de la cara visible.

En la capa inferior se han emplazado todos los componentes que forman el cargador de baterías. Estos componentes están situados entre el conector USB por donde entrará la corriente de carga y los agujeros destinados a soldar la batería.

La antena se ha situado en la esquina superior izquierda, como se realizaron las simulaciones en capítulos anteriores. Como se puede apreciar en las siguientes imágenes, existe una zona libre de cobre en todas las capas de la pcb para garantizar el buen funcionamiento de la antena.

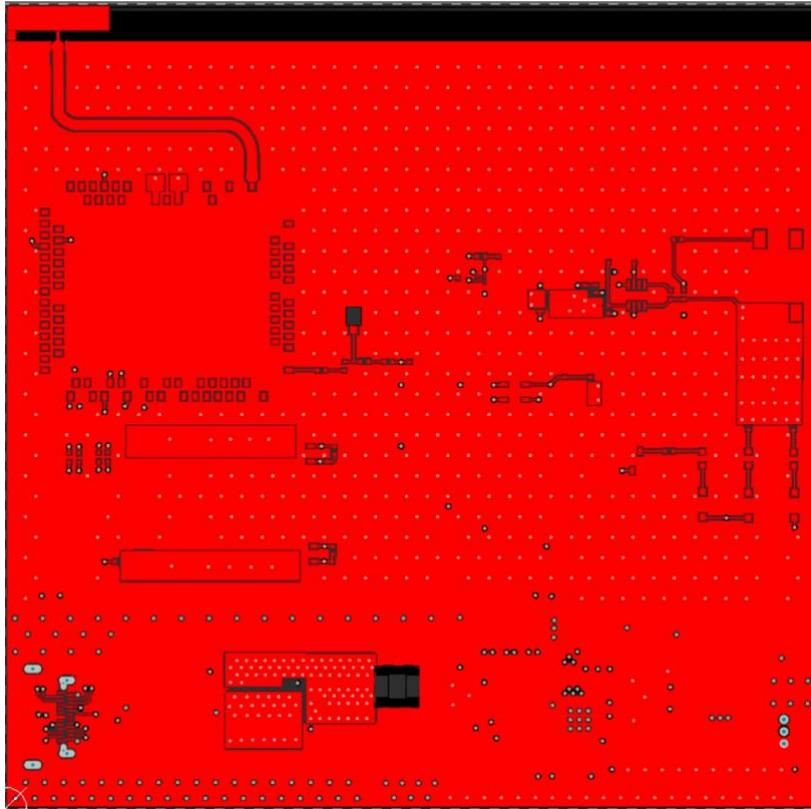


Figura 76. Layout capa Top.

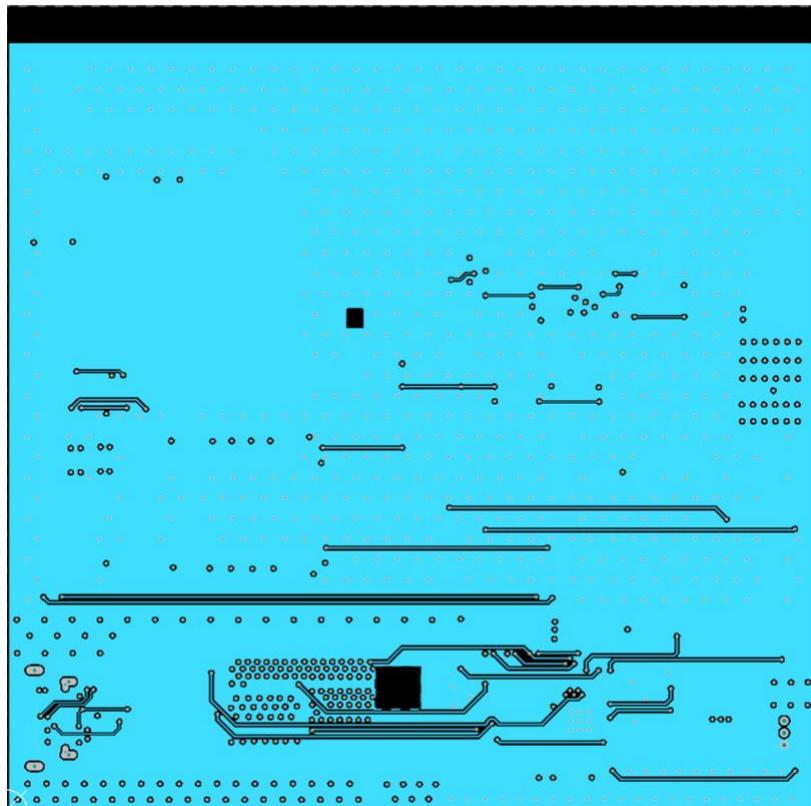


Figura 77. Layout capa Interna 1.

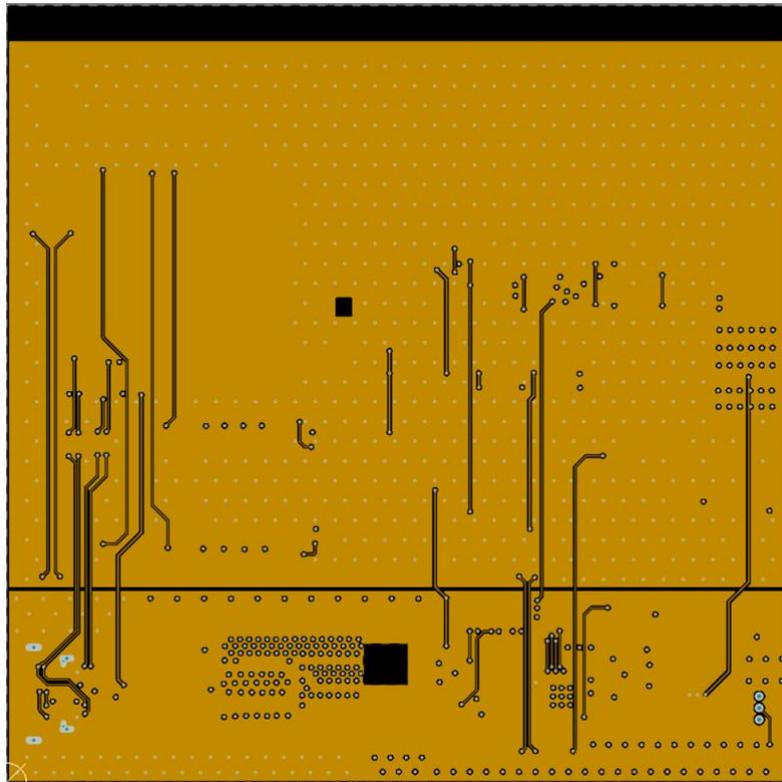


Figura 78. Layout capa Interna 2.

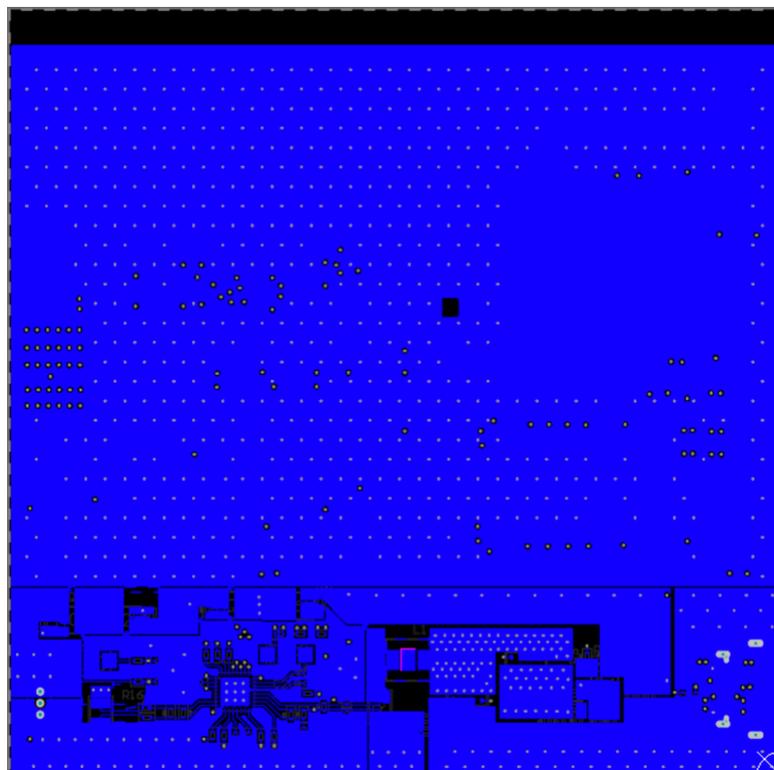


Figura 79. Layout capa Bottom.

Como se han podido ver en las imágenes anteriores, el tamaño de las pistas es de 12 mils en la mayoría de casos, para asegurar que no se van a tener problemas térmicos sobre todo en las pistas que son de alimentación, donde además se han realizado planos para garantizar una buena disipación de potencia.

El siguiente punto crítico se trata de la alimentación de la antena diseñada en capítulos anteriores. Para esta función existen opciones como la línea *microstrip* para lo que se puede utilizar el calculador de pistas *microstrip* online de EMTALK [36]. La otra opción se trata de utilizar una línea coplanar para alimentar la antena, para ello se puede utilizar el calculador online de SPOK [37]. Ambas opciones son validas, pero la más adecuada para la aplicación es la coplanar, ya que el ancho de pista es mucho menor, no se necesita limpiar la zona de cobre como pasaría con la *microstrip*.

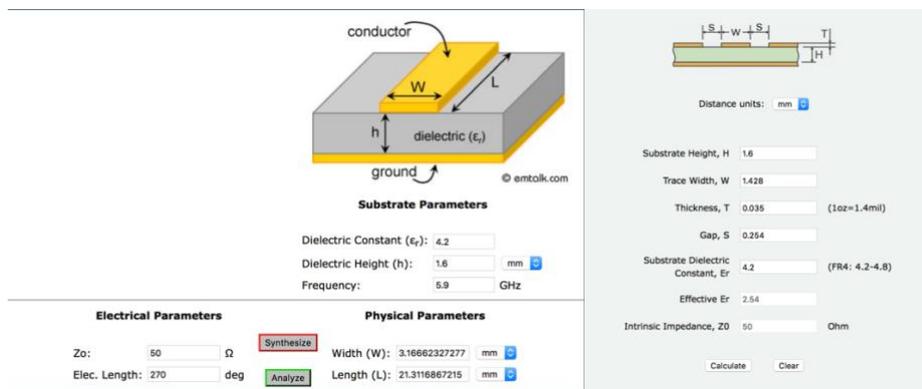


Figura 80. Calculadora EMTALK [36] (izquierda). Calculadora SPOK [37] (derecha).

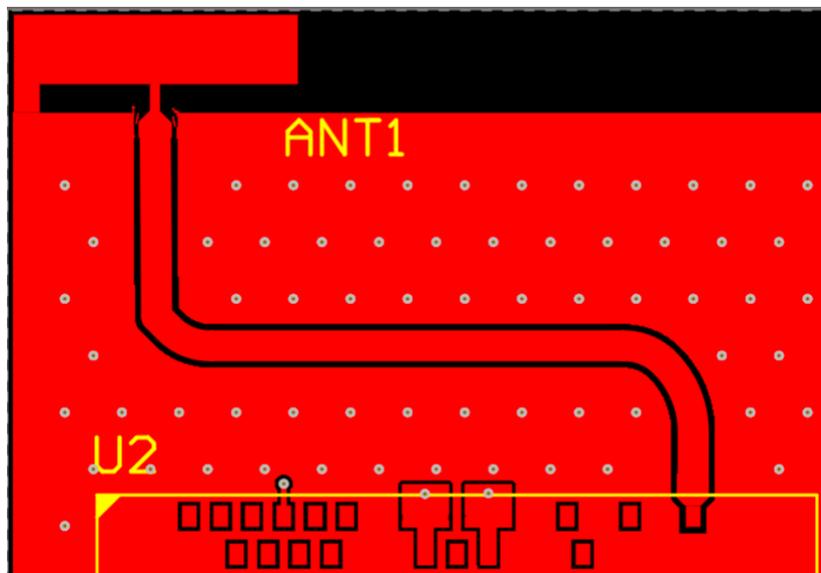


Figura 81. Alimentación de la antena en el layout.

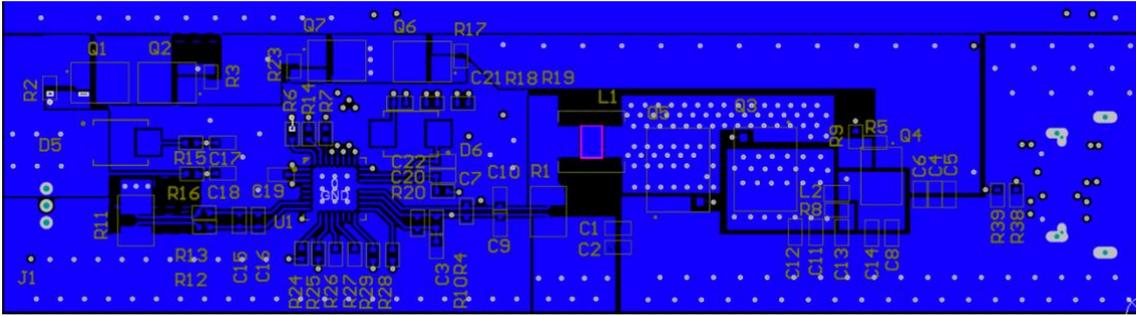


Figura 82. Layout del cargador de baterías.

Para concluir la descripción del circuito impreso, cabe destacar que el cargador de baterías se ha posicionado alejado del microcontrolador por motivos expuestos anteriormente. Además, en esta parte del circuito entra en juego la tierra que viene del USB (PGND) y la tierra del resto del circuito y batería (GND). La conexión de estas tierras se realiza mediante resistencias de precisión (SHUNT).

El conexionado de las tierras mediante la resistencia de precisión, se realiza mediante pistas en lugar de planos de masa, a lo que se le conoce como conexión Kelvin. Con esta conexión se realiza una medida de la corriente que pasa por las tierras con una gran precisión. Realizando una consulta en guías de diseño de la empresa Texas Instruments, se puede entender que la conexión Kelvin es mejor frente a la conexión mediante planos, ya que con la conexión directa se puede reducir el impacto del resto de electrónica. El tamaño de la pista se ajustará a la corriente máxima que puede pasar por el circuito, si estas condiciones no se cumplen se podría perder precisión de la medida.

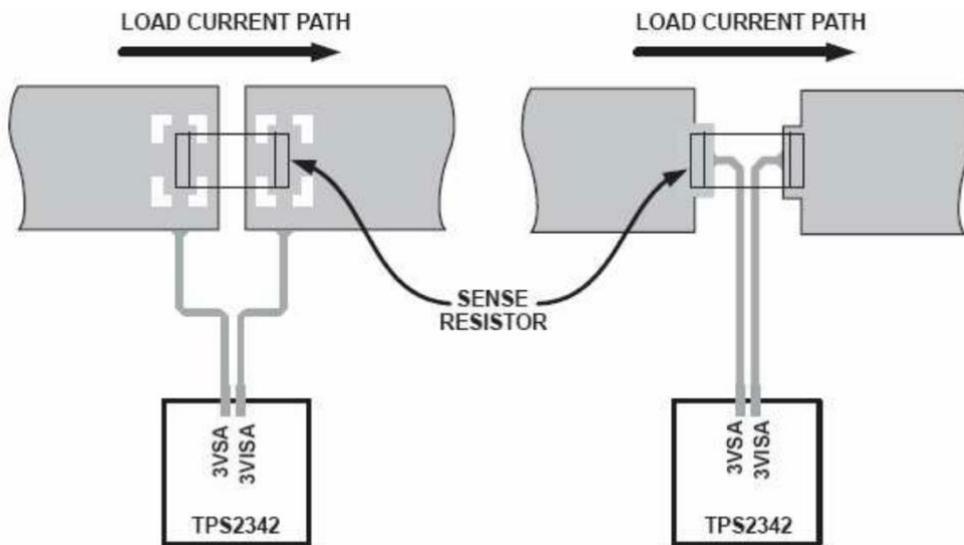


Figura 84. Conexión Kelvin [38].

Además de la conexión Kelvin, se puede destacar los planos y las vías que hay en los MOSFETs del Buck. Estos planos se han puesto por experiencia con este cargador de baterías, para evitar

que los componentes se deterioren por impacto térmico, debido a las pérdidas por conmutación de los MOSFETs. Como se puede ver en la siguiente imagen, la temperatura que alcanza el convertidor en otra aplicación diseñada en Celestica con el mismo driver.



Figura 85. Análisis de temperatura en el *Buck*.

Además de estos planos, vemos una zona sin cobre y sin pistas, que se trata de la bobina de carga del convertidor. Esto se debe a que el trazado de pistas por debajo de esta bobina, sobre todo buses de datos pueden sufrir acoplamiento de ruidos provenientes de la bobina durante la carga y descarga.

Para concluir el capítulo se han adjuntado dos capturas del aspecto en 3D de la tarjeta una vez terminada, con los modelos 3D y de los componentes y su correspondiente serigrafía. El siguiente paso, que se verá en el próximo capítulo, se trata de extraer el paquete de documentación para fabricar el circuito impreso.

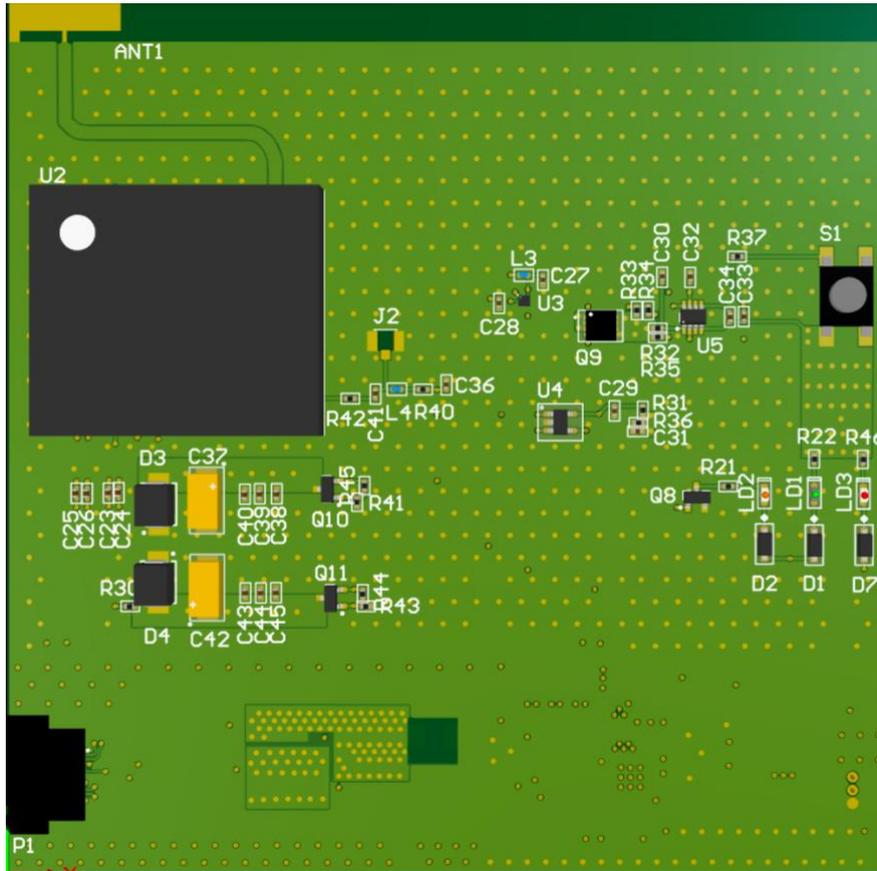


Figura 86. Vista 3D de la cara top.

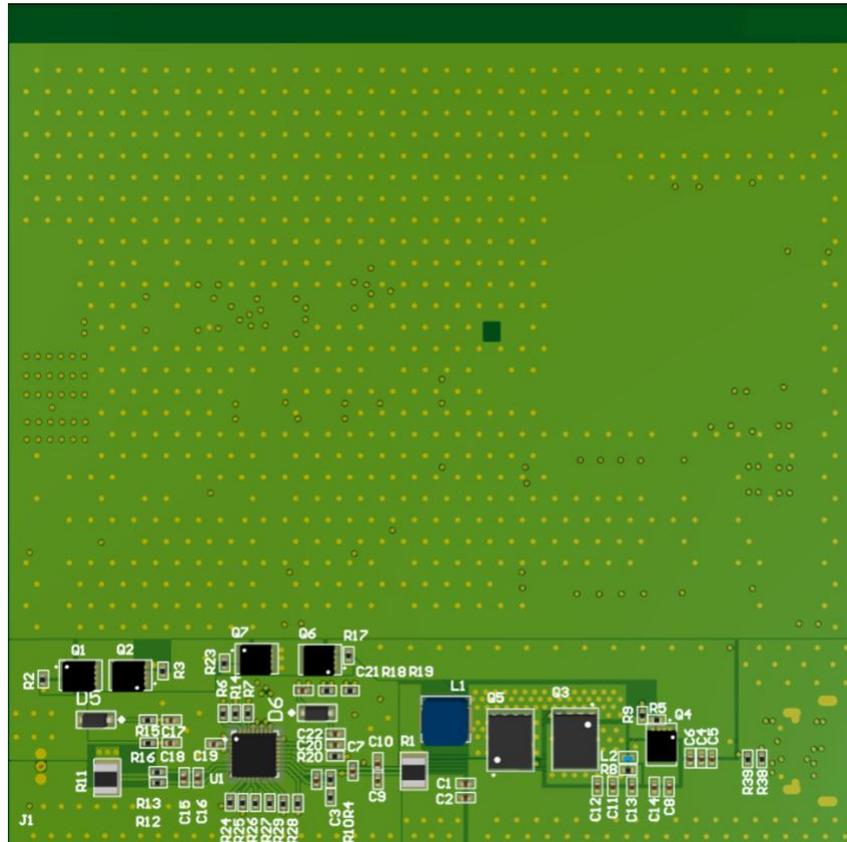


Figura 87. Vista 3D de la cara bottom.



Capítulo 8. Pliego de condiciones.

En este capítulo se tratará la información necesaria para la fabricación del módulo de comunicaciones diseñado anteriormente. Para ello se tratarán documentos como *Bill of Materials*, Planos de *assembly*, Planos de fabricación... No se cubrirán archivos como los *Gerbers*, ya que se tratan de todas las capas del *layout* tratadas de forma individual, usadas por los fabricantes de pcbs.

8.1 Bill of Materials

La *Bill of Materials* (BoM), se trata de un listado de los componentes montados en el circuito impreso, para su compra. A continuación, se podrá ver una tabla con el listado de componentes:

Descripción	Designator	Cantidad	Fabricante	Part Number
Automotive Module	U2	1	Queltec	AG15
Programmable Battery Pack Manager	U1	1	Texas Instruments	BQ40z60
Step Up Converter	U3	1	Texas Instruments	TPS61253
LDO Regulator	U4	1	Microchip	MIC5205
Push Button ON/OFF Regulator	U5	1	Linear	LTC2954-2
Resistor 1Mohms 1%	R2,R3,R5,R45,R44	5	Vishay	RCC04021M00FKED
Resistor 5K1 1%	R6,R7,R9,R17,R23,R12,R13,R30,R41,R43,R38,R39	12	Panasonic	ERA-2ARB512X
Resistor 332K 1%	R4	1	Bourns	CR0402-FX-3323GLF



Resistor 26K1 1%	R10	1	Vishay	CRCW040226K1FKED C
Resistor 0.01R 1%	R1	1	Panasonic	ERJ-M1WSF10MU
Resistor 0.005R 1%	R11	1	Rohm	PMR25HZPFU5L00
Resistor 1K 1%	R16,R21,R22,R4 6,R32,R35,R31	7	KOA Speer	RN73R1ETTP1001F50
Resistor 10K 1%	R25,R26,R27,R1 4	4	Vishay	RCC040210K0FKED
Resistor 100R 1%	R28,R29,R24	3	Vishay	RCC0402100RFKED
Resistor 10R 1%	R18,R19,R15,R2 0,R40	5	Vishay	RCC040210R0FKED
Resistor 0.22R 1%	R8	1	Rohm	UCR01MVPFLR220
Resistor 470K 1%	R37	1	Yageo	RE0402FRE07470KL
Resistor 47K 1%	R34	1	Vishay	RCC040247K0FKED
Resistor 100K 1%	R33	1	Vishay	RCC0402100KFED
Resistor 1K6 1%	R36	1	KOA Speer	RN731ETTP1061F50



Resistor 0R 1%	R42	1	Yageo	PA0402-R-070RL
Capacitor 1nF 50V	C1,C11	2	Murata	GCM155R71H102KA3 7J
Capacitor 1uF 50V	C17,C20,C33,C3 4	4	Taiyo Yuden	UMK105CBJ105MV-F
Capacitor 0.1uF 50V	C36	1	Murata	GCM155L8EH104KE0 7D
Capacitor 10uF 50V	C2,C12,C13,C8,C 14,C19,C28	7	Murata	GRM155R60J106ME05 J
Capacitor 2.2uF 50V	C22,C29	2	Murata	GRM155R6YA225ME1 1D
Capacitor 22pF 50V	C3	1	TDK	C1005C0G1H221J050B E
Capacitor 100nF 50V	C7,C9,C10,C15,C 16,C18,C21,C30, C32,C40,C45	11	Taiyo Yuden	UMK105BJ104KV-F
Capacitor 100uF 50V	C37,C42	2	KEMET	C1210C107M4PACTU
Capacitor 100pF 50V	C41	1	KEMET	C0402C101F5GACAU TO
Capacitor 33pF 50V	C39,C44	2	Murata	GCQ1555C1H330JB01 D



Capacitor 10pF 50V	C38,C44	2	Murata	GCQ1555C1H100RB01 D
Capacitor 22uF 50V	C4,C5,C6	3	AVX	04026D226MAT2A
Capacitor 4.7uF 50V	C27	1	AVX	0402YD475MAT2A
Capacitor 470pF 50V	C31	1	TDK	CGA2B2C0G1H471J05 0BE
Choke 3.3uH	L1	1	Vishay	IHLP2020CZER3R3M0 1
Choke 470nH	L2	1	Murata	DFE18SBNR47ME0
Choke 1uH	L3	1	Murata	LQM18PH1R0MFRL
Choke 47nH	L4	1	Murata	LQW18AS47NJ0ZD
N-CH MOSFET 40V	Q1,Q2,Q4,Q6,Q7, Q9	6	Vishay	SISA72DN-T1-GE3
N-CH MOSFET 40V	Q5,Q3	2	Texas Instruments	CSD18504
N-CH MOSFET 40V	Q10,Q11	2	On Semi	BSS138
Switch	S1	1	C&K	PTS647SM38SMTR2L FS



USB Conector	P1	1	JAE Electronics	DX07S016JA1R1500
UFL	J2	1	Hirose	U.FL-R-SMT
Diode Schottky	D5,D6	2	Diodes Inc.	MBR0580S1-7
Diode	D1,D2,D7	3	Vishay	1N4148W
TVS	D3,D4	2	Littelfuse	SMBJ6A
GREEN LED	LD1	1	Kingbright	APTD1608LCGCK
YELLOW LED	LD2	1	Kingbright	APTD1608LSYCK
RED LED	LD3	1	Kingbright	APTD1608LCRCK
Antena GPS	ANT2	1	Pulse Larsen	GPSMOD1333
Batería	BAT1	1	Ultralife	UBBL39

Tabla 8. Bill of Materials.

8.2 Planos de assembly

Los planos de *assembly* son fundamentales para el correcto montaje de los componentes. Estos planos son complementarios al archivo que se genera de *Pick and Place* con el origen de los componentes para que se pueda automatizar su posicionamiento con las máquinas. Los planos indican la polaridad de los componentes, para que los operarios tengan la información completa para programar la máquina de *Pick and Place* y las posteriores inspecciones visuales.

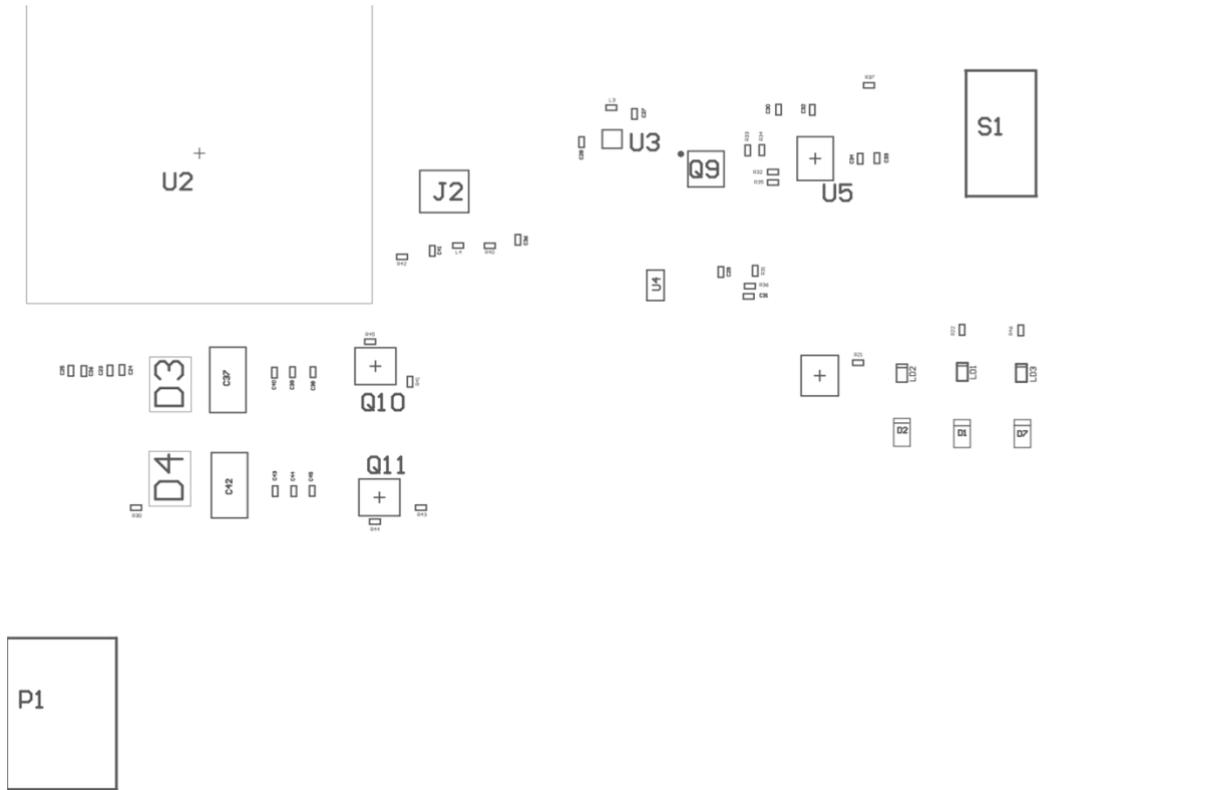


Figura 88. Assembly drawing TOP.

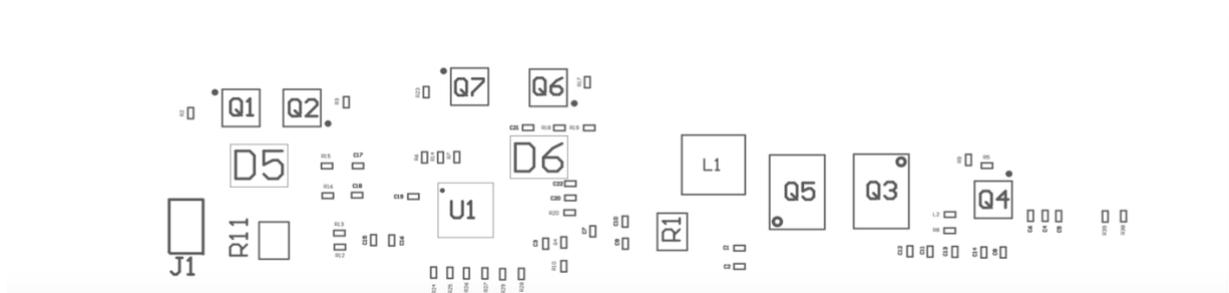


Figura 89. Assembly drawing Bottom.



8.3 Información complementaria

Por último, se deben de especificar las características del circuito impreso, más allá del grosor de la PCB. A continuación, se puede ver un ejemplo de especificaciones si el proyecto se realizara en Celestica.

PCB Fabrication Specifications:

1.- Dielectric thickness values are recommended and can be slightly adjusted by PCB Fab in order to match commercial values

2.- This board must be fabricated to IPC-6012B (or Latest revision): Qualification and performance specifications for rigid printed circuit boards and must conform to Celestica Spec CELQ-001-SPEC-2 (or latest revision). Any deviation must be approved in writing by Celestica

3.- Surface Finish: ENIG (Electroless Nickel / Immersion Gold)
According Spec IPC-4552 Latest Revision
Thickness: Nickel 3-6um, Gold 0.050um (To reduce risk of IFF or Black Pad)

4.- Soldermask Requirements:
Colour: Green
Type: LPISM
Mask Spec: See Celestica CELQ-001-SPEC-2 or Latest Revision

5.- Peelable Mask Requirements: N/A

6.- Silkscreen Requirements:
Number of Silkscreen Layers: 2
Colour: White
Silkscreen Specifications: See CELQ-001-SPEC-2
Silkscreen distortion over tracks is acceptable
Silkscreen over solderpads is not acceptable, fabricator to run
Silkscreen cutback if appropriate.

7.- Bare Board Test Requirements:
All boards should be supplied fully electrically tested to netlist supplied.
A check is required between gerber and drill data supplied and the CAD derived netlist. Any net check fail not documented by Celestica as a variance concession should be formally reported to Celestica and the job placed on hold until such time that all the problems have been resolved.

8.- PCB Fabricator may remove unused pads in inner layers, if they are present.

9.- Boards must be delivered in panel, as specified in drawing.

10.- Boards should be ROHS compliant according EU directive 2011/65/EU
Tg > 135 C (Glass Transition Temperature)
Td > 350 C (Decomposition Temperature)
CTE (Z) 3.5-4% non DICY (Coefficient of thermal expansion Z axis)

11.- Gerbers and NC Drill files generated in millimeters and format 4:4.

Figura 90. Notas de fabricación.

Además de las notas de fabricación anterior, se añade el tipo de taladro y la ubicación de estos taladros para que el pertinente departamento de calidad pueda comparar los datos con lo fabricado. Los taladros que se fabrican se extraen de un archivo que se llama NC Drills, y debe encajar con la información mostrada.

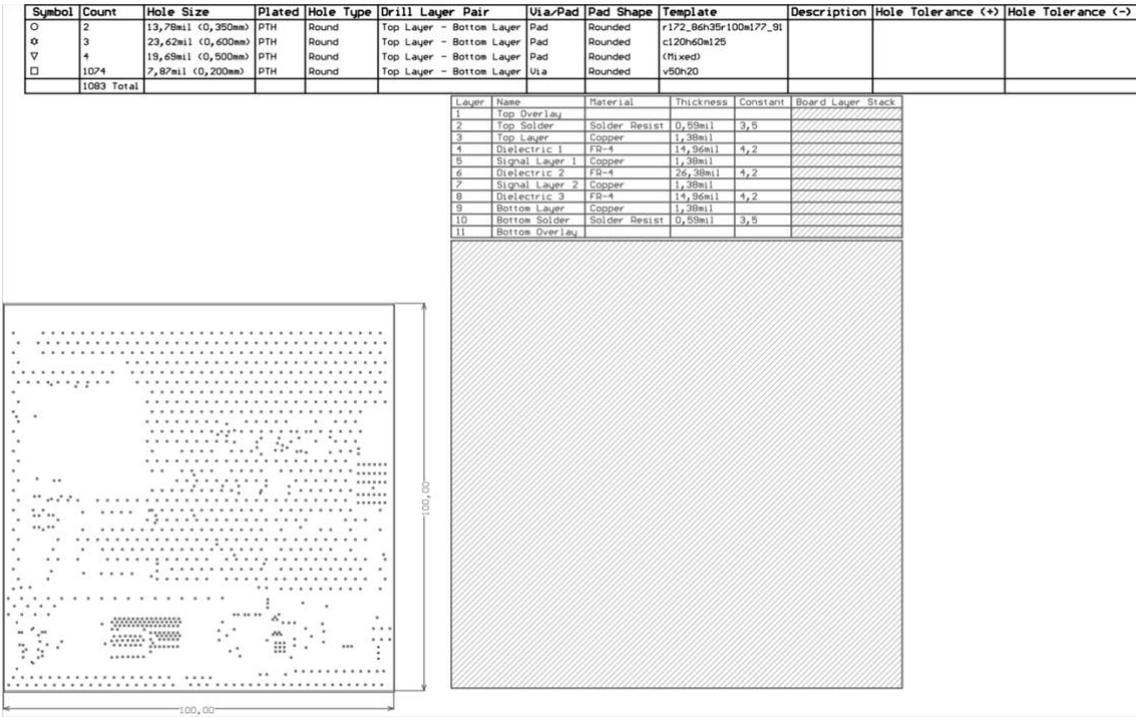


Figura 91. Información de los taladros.



Capítulo 9. Conclusiones y líneas futuras.

Una vez finalizado el proyecto, se puede concluir que se trata un diseño multidisciplinar en el que se combinan conocimientos sobre el diseño de antenas y conocimientos sobre el diseño electrónico.

Además, se trata de un proyecto enfocado a un estándar en crecimiento como es el *Car2Car*, sobre el que apenas hay productos en el mercado. Por lo que se podría decir que es una idea de producto innovadora. Además, el resto de los productos existentes actuales, se tratan de productos que avisan al conductor de forma visual, por lo que las condiciones medioambientales influyen demasiado a la hora de visualizar al ciclista. Mientras que el dispositivo diseñado, se comunica directamente con el vehículo, por lo que la alerta aparecería en el interior del vehículo del conductor, consiguiendo así una mayor seguridad.

Este diseño presentado se podría considerar el diseño de un primer prototipo en el cuál existe un gran margen de mejora. Tras su fabricación y sus posteriores pruebas se podrán determinar muchos más aspectos en los que conseguir un mejor rendimiento.

Desde el punto de vista físico, el módulo se puede reducir en tamaño ya que cuenta con mucho espacio libre dentro del circuito impreso, por lo que se podría realizar una versión mucho más reducida y estética, formando un producto más vendible.

Respecto a la electrónica, se puede reducir considerablemente el número de componentes, ya que se podría hacer un diseño con un único microcontrolador. Esta idea tiene el inconveniente de que todas las características integradas en el BQ40z60 o características hardware, pasan a tener que desarrollarse vía firmware, algo que puede llegar a ser muy complicado. Esto es debido a que el BQ40z60 cuenta con una serie de protecciones que hacen del chip uno de los cargadores de baterías más competitivos del mercado. Si se prescindiera de algunas protecciones con cualquier microcontrolador capaz de producir una señal PWM, se puede diseñar un cargador de baterías programable basado en un *Buck*. Por lo que se podría conseguir una opción considerablemente más económica que el actual diseño a la hora de fabricar el módulo.

Como futuros desarrollos utilizando la idea de producto expuesta en esta memoria, sería interesante utilizar una antena de tipo parche en la luz delantera de la bicicleta y otra en la parte del sillín para así cubrir ambas direcciones. Esta idea se descartó ya que cabe recordar que este tipo de antena es totalmente directiva por lo que se necesitarían dos módulos. Esto se podría solventar añadiendo un módulo *bluetooth* que permita la comunicación entre los dos módulos y poder salvar el apantallamiento del ciclista. Para esto se podría utilizar el módulo nRF52805 de la empresa Nordic Semiconductor. Este módulo se trata de una opción muy interesante ya que se trata de uno de los módulos *bluetooth* más pequeños del mercado, por lo que no habría que hacer grandes esfuerzos para emplazarlo en nuestro diseño actual.

Una idea de diseño interesante podría ser, diseñar una antena externa al módulo, es decir por ejemplo usar parte del manillar de la bicicleta como elemento radiante. De manera que el módulo de comunicaciones sería mucho más pequeño y la antena ya iría integrada en todas las bicicletas de manera que el módulo podría ser *plug and play*.



Bibliografía

[1] «Car 2 Car Communication Consortium». [En línea]. Disponible en: <https://www.car-2-car.org>

[2] Sean Kinney «What is C-V2X ». [En línea] Disponible en:

<https://www.rcrwireless.com/20180601/network-infrastructure/what-is-c-v2x-tag17-tag99>

[3] «Sittraffic Vehicle2x Siemens». [En línea]. Disponible en:

<https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/road/traffic-management/connected-mobility/sittraffic-vehicle2x.html>

[4] «IEEE 802.11p - 2010». [En línea]. Disponible en:

https://standards.ieee.org/standard/802_11p-2010.html

[5] «BikeSphere - TrendyDriversMichelin». [En línea]. Disponible en:

<https://trendydrivers.michelin.es/ideas/bikesphere>

[6] «Backtracker - GARMIN». [En línea]. Disponible en:

<https://buy.garmin.com/en-US/US/p/518151>

[7] «STM32F103CBT7 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103cb.pdf>

[8] «AG15 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

https://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel_AG15_C-V2X_Specification_V1.%200.pdf

[9] «UBBL39 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.ultralifecorporation.com/ECommerce/product/ubbl39/li-ion-rechargeable-1s1p-battery>

[10] «BQ34z100 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq34z100.pdf?ts=1599583339676&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ34Z100

[11] «BQ24610 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24610.pdf?ts=1599583500564&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[12] «LTC4100 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4100fc.pdf>



[13] «BQ40z60 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq40z60.pdf?ts=1599590197669&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ40Z60

[14] «BQStudio Tool». [Software]. Disponible en:

<https://www.ti.com/tool/bqstudio>

[15] «Learning Cycle - SLUA777». [En línea]. Disponible en:

https://www.ti.com/lit/an/sl原因777/sl原因777.pdf?ts=1599590282865&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.c

[16] «Learning Cycle - SLUA903». [En línea]. Disponible en:

<http://www.ti.com/lit/an/sl原因903/sl原因903.pdf>

[17] «USB 3.0 Standard». [En línea]. Disponible en:

<https://www.usb.org/documents>

[18] «LTC2954 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2954fb.pdf>

[19] «LTSpice». [Software]. Disponible en:

<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

[20] «TPS61253 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.ti.com/product/TPS61253>

[21] «MIC5205 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005785A.pdf>

[22] «CSD18504 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.ti.com/product/CSD18504Q5A>

[23] «SISA72DN - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.vishay.com/docs/75680/sisa72dn.pdf>

[24] «CST Microwave Studio». [Software]. Disponible en:

https://www.3ds.com/products-services/simulia/?woc=%7B%22brand%22%3A%5B%22brand%2Fsimulia%22%5D%7D&utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=products

[25] «Reparación de Iphone - Blog». [En línea]. Disponible en:



<https://es.ifixit.com/Gu%C3%ADa/Reemplazo+de+antena+inalámbrica+del+iPhone+6/90315>

[26] «MásMóvil - Blog». [En línea]. Disponible en:

<https://blog.masmovil.es/como-han-cambiado-los-moviles-en-tres-decadas/>

[27] Cardama, A. (2002), «Antenas», Universitat Politècnica de Catalunya, España, Edicions UPC 2nd ed.

[28] Secmen, M. (2011), «Multiband and Wideband Antennas for Mobile Communications Systems». Electrical and Electronics Engineering Department, Yasar University, Turkey.

[29] Zhang, Z. (2017), «Antenna design for mobile devices». John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, Singapore.

[30] «Printed F Antenna». [En línea]. Disponible en:

<http://www.antenna-theory.com>

[31] «Microstrip Patch Antenna». [En línea]. Disponible en:

https://www.researchgate.net/figure/A-microstrip-patch-antenna_fig2_287277777

[32] «GPSMOD1333 - Datasheet». [En línea]. Disponible en:

<https://www.pulselarsenantennas.com/product/gpsmod1333/>

[33] «Calculadora de pistas online». [En línea]. Disponible en:

[https:// www.TheCircuitCalculator.com](https://www.TheCircuitCalculator.com)

[34] « Saturn PCB Toolkit ». [Software]. Disponible en:

http://saturnpcb.com/pcb_toolkit/

[35] «Calculadora de pistas online». [En línea]. Disponible en:

[https:// www.TheCircuitCalculator.com](https://www.TheCircuitCalculator.com)

[36] «Calculadora de pistas microstrip online». [En línea]. Disponible en:

<https://www.emtalk.com>

[37] «Calculadora de pistas coplanares online». [En línea]. Disponible en:

<https://spok.ca/index.php/resources/tools/99-cpwwcalc>

[38] «Conexión Kelvin». [En línea]. Disponible en:

https://www.ti.com/lit/ug/slua366/slua366.pdf?ts=1599601009967&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[39] «Generic Standard on Printed Board Design - IPC2221». [En línea]. Disponible en:



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

<https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221.pdf>