



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Diseño e implementación de nodo autónomo IoT para una red de área amplia de bajo consumo (LPWAN): aplicación a la gestión de luminarias urbanas inteligentes

AUTOR: JORGE ARGENTE GARRIGÓS

TUTOR: JUAN JOSÉ PÉREZ MARTÍNEZ

Selección: GUILLERMO SÁNCHEZ PLAZA

Curso Académico: 2020-21

AGRADECIMIENTOS

“A todas las personas que me han ayudado a realizar este proyecto y, en especial, a mi familia”

RESUMEN

Para lograr la gestión efectiva de sistemas constituidos por numerosos elementos dispersos sin conectividad a internet por su ubicación en zonas rurales, aisladas o despobladas, resulta de gran importancia encontrar soluciones de interconexión alternativas a las convencionales.

Se plantea el uso de redes en forma de malla que hagan uso de tecnologías LPWAN. Este tipo de red estaría constituido por múltiples nodos aislados y autónomos, que tengan la posibilidad de comunicarse con el resto de nodos, o con una puerta de enlace que dote a toda la red de conectividad a internet. La comunicación con los nodos permitiría la gestión, vigilancia y monitorización en tiempo real, y de forma remota, de las aplicaciones en las que se utilice. En este trabajo se va a realizar el diseño e implementación de uno de estos nodos atendiendo a los requisitos de las aplicaciones previstas.

Pueden encontrarse aplicaciones para este dispositivo en distintos ámbitos: para usos agrícolas y ganaderos sería útil como dispositivo de seguimiento para ganado, telemando de válvulas para riego o administración de químicos, monitorización de condiciones del terreno, alerta temprana contra incendios o robo de cosechas; en ciudades inteligentes para gestión de luminarias, de aparcamientos, monitorización de calidad del aire y nivel de CO₂ en locales comerciales.

El objetivo es diseñar un dispositivo inteligente, autónomo, de bajo consumo energético, que pueda transmitir bajo volumen de datos a largas distancias y con capacidad de conocer y actuar con elementos del entorno. La solución adoptada debe ser una solución integrada y escalable, a la vez que flexible, para permitir su uso en distintas aplicaciones. Además, el hecho de que, una vez el dispositivo diseñado haya sido desplegado en el campo, se encuentre en localizaciones aisladas y en situación desatendida, obliga a tomar en consideración que las posibilidades de realizar mantenimiento serán limitadas, aun cuando se encuentre en condiciones hostiles, como son la exposición a la lluvia, el polvo o la intemperie.

El resultado del proyecto será una tarjeta de circuito impreso funcional, basada en un microcontrolador, que cumpla los objetivos expuestos. Posteriormente se fabricará en el laboratorio una maqueta de aplicación para *smart lighting*, en la que se gestione una luminaria LED y se realizarán pruebas de campo con la tarjeta para verificar el éxito del proyecto.

Palabras Clave: Internet de las Cosas, IoT, microcontrolador, LPWAN, LoRa, dispositivo, circuito impreso, solar, recolector de energía, célula fotovoltaica, integrado, escalable, autónomo, remoto, red en malla, nodo, ciudad inteligente, luminaria, tropicalizado, batería, radio.

RESUM

Per aconseguir la gestió efectiva de sistemes constituïts per nombrosos elements dispersos sense connectivitat a internet per la seua ubicació en zones rurals, aïllades o despoblades, resulta de gran importància trobar solucions d'interconnexió alternatives a les convencionals.

Es planteja l'ús de xarxes en forma de malla que facen ús de tecnologies LPWAN. Aquest tipus de xarxa estaria constituït per múltiples nodes aïllats i autònoms, que tinguen la possibilitat de comunicar-se amb la resta de nodes, o amb una, de que dote a tota la xarxa de connectivitat a internet. La comunicació amb els nodes permetria la gestió, vigilància i monitorització en temps real, i de forma remota, de les aplicacions en les que s'utilitze. En aquest treball es va a realitzar el disseny i implementació d'un d'aquests nodes atenent als requisits de les aplicacions previstes.

Poden trobar aplicacions per a aquest dispositiu en diferents àmbits: per a usos agrícoles i ramaders seria útil com a dispositiu de seguiment per a bestiar, telecomandament de vàlvules per a reg o administració de químics, monitorització de condicions del terreny, alerta primerenca contra incendis o robatori de collites; en ciutats intel·ligents per a gestió de lluminàries, d'aparcaments, monitorització de qualitat de l'aire i nivell de CO₂ a locals comercials.

L'objectiu és dissenyar un dispositiu intel·ligent, autònom, de baix consum energètic, que pugui transmetre sota volum de dades a llargues distàncies i amb capacitat de conèixer i actuar amb elements de l'entorn. La solució adoptada ha de ser una solució integrada i escalable, alhora que flexible, per a permetre el seu ús en diferents aplicacions. A més, el fet que, una vegada el dispositiu dissenyat haja sigut desplegat en el camp, es trobe en localitzacions aïllades i en situació desatesa, obliga a prendre en consideració que les possibilitats de realitzar manteniment seran limitades, encara que es trobe en condicions hostils, com són l'exposició a la pluja, la pols o la intempèrie.

El resultat del projecte serà una targeta de circuit imprès funcional, basada en un microcontrolador, que complisca els objectius exposats. Posteriorment es fabricarà en el laboratori una maqueta d'aplicació per a smart lighting, en la qual es gestiona una lluminària LED i es realitzaran proves de camp amb la targeta per a verificar l'èxit del projecte.

Paraules clau: Internet de les coses, IOT, microcontrolador, LPWAN, Lora, dispositiu, circuit imprès, solar, recol·lector d'energia, cèl·lula fotovoltaica, integrat, escalable, autònom, remot, xarxa en malla, node, ciutat intel·ligent, lluminària, tropicalitzat, bateria, ràdio.

ABSTRACT

To achieve effective management of systems made up of a set of dispersed elements without internet connectivity due to their location in rural, isolated or unpopulated areas, it is of great importance to find alternative interconnection methods to conventional ones. In this work is proposed the use of mesh networks that make use of Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies. This type of network would be made up of multiple isolated and autonomous nodes, which have the possibility of communicating with the rest of the nodes, or with a gateway that provides internet connectivity to the entire network. The communication with the nodes would allow the management, surveillance and monitoring in real time, and remotely, of the applications in which it is used. The design and implementation of one of these nodes will be carried out in this work. This will be done taking into account the requirements of the planned applications.

Applications for this device can be found in many different areas: for agricultural and livestock uses it would be useful as a tracking device for livestock, remote control of valves for irrigation or for chemical administration, ground condition monitoring, early warning against fires or theft of crops; in smart cities for lighting or parking management, air quality and CO₂ level monitoring.

The goal is to design an intelligent stand-alone device, with low energy consumption, which can transmit a low volume of data over long distances, and with the ability to know and act with elements of the environment. The adopted solution has to be an integrated and scalable one, as well as flexible, to allow its use in different applications. In addition, the fact that once the designed device has been deployed in isolated locations and in an unattended situation, makes it necessary to take into account that the possibility of carrying out maintenance works will be very limited. This is a matter of great importance if the device is exposed to hostile environments such as rain, dust or bad weather situations.

The result of this work will be a functional printed circuit board based on a microcontroller that meets the stated goals. Subsequently, an application model for smart lighting will be set-up in the laboratory; a test fixture in which an LED luminaire is managed by means of the designed device. Field tests will be carried out with the manufactured device to verify the success of the project.

Keywords: Internet of Things, IoT, microcontroller, LPWAN, Low Power Wide Area Network, LoRa, device, Printed Circuit Board, PCB, solar, energy harvester, photovoltaic cell, integrated, scalable, standalone, remote, mesh, node, smart, luminaire, coating, battery, radio.

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- I. Memoria
- II. Presupuesto
- III. Planos
- IV. Anexos
 - Anexo A. Organización del proyecto
 - Anexo B. Diagramas
 - Anexo C. Lista de materiales
 - Anexo D. Código
 - Anexo E. Cálculos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Penetración del servicio telefónico básico por comunidades autónomas en el periodo 1987-1992 (Telefónica, 1992).	3
Figura 2. Mapa de cobertura de la red TMA-900A en el año 1996 (Telefónica, 1996).	4
Figura 3. Cobertura GSM actual del operador Movistar en España (GSMA).	6
Figura 4. Cobertura GSM actual del operador Vodafone en España (GSMA).	6
Figura 5. Cobertura 4G actual del operador Movistar en España (Movistar).	7
Figura 6. Sistema CityPaq de Correos para entrega automática de paquetería. Requiere conectividad GPRS para funcionar (Correos, 2017).	7
Figura 7. Ingresos de las empresas de telecomunicaciones ponderados por unidad de datos en los distintos continentes (Deloitte, 2018).	8
Figura 8. Promedio de ingresos por usuario del sector de las telecomunicaciones en los distintos continentes (Deloitte, 2018).	9
Figura 9. Esquema de la tipología de la red (TALQ Consortium, 2018).	13
Figura 10. Cantidad de números en uso para servicios M2M según el tipo de numeración empleada. Los años 2020 y 2021 corresponden a previsiones de uso (Comision Nacional de los Mercados y la Competencia, 2019).	16
Figura 11. Mapa de cobertura de la red Sigfox en el continente europeo. En azul se visualizan las áreas en las que existe cobertura de esta red (Sigfox).	17
Figura 12. Gateway LoRaWAN conectado a The Things Network localizado en la UPV (The Things Network).	19
Figura 13. Comparativa técnica de las distintas tecnologías LPWAN (ABI Research).	19
Figura 14. Clasificación en categorías de las distintas tecnologías de comunicaciones (McKinsey&Company, 2017).	21
Figura 15. <i>Parte superior de la tarjeta Wavecom Q52 Omni (Elaboración propia)</i>	24
Figura 16. Nodo LoRa de elektor (Elektor, 2019).	25
Figura 17. Conjunto de elementos que forman el P-NUCLEO-LRWAN1 (ST-Microelectronics).	26
Figura 18. Esquema conceptual del dispositivo planteado en el que se muestran los distintos subsistemas de los que está compuesto (Elaboración propia).	28
Figura 19. Detalle de definición de las conexiones en el microcontrolador (Elaboración propia).	35
Figura 20. Esquema eléctrico del conector JTAG incluido en la tarjeta desarrollada (Elaboración propia).	36
Figura 21. ST-LINK V2-1 de la tarjeta Nucleo 476 (Elaboración propia).	36
Figura 22. Módulo LoRa RFM95W-868S2 (HopeRF, 2013).	37

Figura 23. Detalle de conexión del módulo RFM95W (Elaboración propia).....	38
Figura 24. Detalle de las líneas de UART del módulo de Geoposicionamiento (Elaboración propia).....	40
Figura 25. Fragmento del esquema eléctrico en el que se muestra el circuito de carga (Elaboración propia).....	40
Figura 26. Caracterización de módulo fotovoltaico en función del número de ciclos térmicos (Valencia Nanophotonics Technology Center, 2019).....	41
Figura 27. Diodo Schottky en serie con el módulo fotovoltaico para evitar circulación inversa de corriente (Elaboración propia).	42
Figura 28. Sistemas de energía del dispositivo diseñado (Elaboración propia).....	43
Figura 29. Esquema eléctrico de la conexión del integrado de gestión de energía LTC3106 implementado en el dispositivo (Elaboración propia).	45
Figura 30. Esquema eléctrico de la implementación del convertidor AP62250WU-7 en la tarjeta diseñada (Elaboración propia).	49
Figura 31. Switchcraft RAPC722 (Switchcraft).	50
Figura 32. Comparativa física entre USB micro-B y USB tipo C (Dreamstime).	50
Figura 33. Conector terminal de bloque (Mouser).	51
Figura 34. Tensión de una célula de Litio Ion con corriente de descarga de 3A a distintas temperaturas (Battery University, 2019).	52
Figura 35. Conexión para batería externa (Elaboración propia).....	52
Figura 36. Diagrama detallado de los componentes del Nodo LoRa (Elaboración propia).	54
Figura 37. Curva típica de célula fotovoltaica.....	55
Figura 38. Pictograma de dispositivo sensible a descargas electrostáticas (Wikimedia Commons, 2007).	56
Figura 39. Diodos para protección de descargas electrostáticas instalados en las líneas del bus JTAG (Elaboración propia).....	57
Figura 40. Subdivisiones de una unidad de equipo electrónico (American National Standards Institute , 1975).....	59
Figura 41. Etiqueta de la net de un esquema eléctrico (elaboración propia).	60
Figura 42. Representación esquemática de un circuito sencillo acompañado de su netlist equivalente (elaboración propia).....	61
Figura 43. Cara inferior del circuito impreso en la que se muestra el módulo fotovoltaico (elaboración propia).....	63
Figura 44. Estructura del laminado de un circuito impreso de dos caras (Sekalski, 2007).....	63
Figura 45. Tejido tafetán de fibra de vidrio 7628 utilizado en laminados para circuito impreso (Isola, 2017).....	64

Figura 46. <i>Stack-Up del circuito impreso fabricado (elaboración propia)</i>	66
Figura 47. Puntos de test para facilitar la medida de las tensiones principales de la tarjeta (Elaboración propia).....	66
Figura 48. Disposición de los principales componentes de la tarjeta en la cara superior (Elaboración propia).....	67
Figura 49. Detalle del convertidor de tensión en la capa 1 del circuito impreso, TOP (Elaboración propia).....	68
Figura 50. Detalle del convertidor de tensión en la capa 2 del circuito impreso, INT1 [VCC] (Elaboración propia).....	68
Figura 51. Detalle del convertidor de tensión en la capa 3 del circuito impreso, INT2 [GND] (Elaboración propia).....	69
Figura 52. Detalle del convertidor de tensión en la capa 4 del circuito impreso, [Bottom] (Elaboración propia).....	69
Figura 53. Conexiones del conector de expansión de datos J9 y de energía J10 (Elaboración propia).....	70
Figura 54. Espacio reservado para una tarjeta de expansión (Elaboración propia).....	70
Figura 55. Detalle del trazado de las pistas en las cercanías del microcontrolador (elaboración propia).....	71
Figura 56. Representación en 3D del módulo de comunicaciones RFM95W con guía de onda que une una antena en el circuito impreso y conector SMA para antena externa (elaboración propia).	71
Figura 57. Guía de onda coplanar con plano de masa (C. Wadell, 1991).	72
Figura 58. Guía de onda coplanar que une el módulo de comunicaciones RFM95W con las antenas (Elaboración propia).	73
Figura 59. Guía de onda y antena del sistema de geoposicionamiento (Elaboración propia). ..	74
Figura 60. Vista alternativa de la tarjeta Nodo LoRa desarrollada a lo largo del proyecto (elaboración propia).....	75
Figura 61. Cara superior de la tarjeta Nodo LoRa (elaboración propia).....	76
Figura 62. Diagrama de posicionamiento de los elementos de la maqueta del nodo luminaria (Elaboración propia).....	78
Figura 63. <i>Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo luminaria (Elaboración propia)</i>	79
Figura 64. Aspecto final de la maqueta de desarrollo del nodo luminaria (Elaboración propia).	80
Figura 65. Cálculo de dimensiones de la línea de transmisión del sistema de comunicaciones (Elaboración propia).....	A. 18
Figura 66. Cálculo de dimensiones de la línea de transmisión del sistema de Geoposicionamiento (Elaboración propia).....	A. 18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de características de los microcontroladores analizados	33
Tabla 2. Características técnicas principales de los módulos de radiocomunicaciones LoRa analizados.....	37
Tabla 3. Detalle de las conexiones del módulo RFM95W con el microcontrolador.....	38
Tabla 4. Características técnicas principales de los módulos de geolocalización analizados.....	39
Tabla 5. Características técnicas principales de los integrados de gestión de energía analizados.	44
Tabla 6. Selección de la tensión de salida del integrado LTC3106 (Linear Technology, 2015)...	44
Tabla 7. Selección de tensión de la batería (Linear Technology, 2015).....	45
Tabla 8. Comparativa de los distintos convertidores de tensión analizados.....	48
Tabla 9. Comparativa de los conectores USB analizados.	50
Tabla 10. Cuadro de precios de la mano de obra	P. 1
Tabla 11. Cuadro de mediciones de la mano de obra para el ingeniero de desarrollo.....	P. 2

LISTA DE ACRÓNIMOS

ARM	Advanced RISC Machine
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
BOM	Bill Of Materials
CA	Corriente Alterna
CAN	Controller Area Network
CC	Corriente Continua
CDPD	Cellular Digital Packet Data
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CSD	Circuit Switched Data
CSS	Chirp Spread Spectrum
CTNE	Compañía Telefónica Nacional de España
DBPSK	Diferential Binary Phase-Shift Keying
DFT	Design For Test
EC-GSM	Extended Coverage GSM
EDGE.	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EDT	Estructura de Descomposición del Trabajo
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold
ESD	ElectroStatic Discharge
ETFE	Etileno-TetraFluoroEtileno
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FPU	Floating Point Unit
FR-4	Flame Retardant 4
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPIO	General Purpose Input/Output
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	Global System for Mobile communications
HPS	High Pressure Sodium
I/O	Input / Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
ICT	In Circuit Test
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial Scientific and Medical
JTAG	Joint Test Action Group
LED	Light Emitting Diode
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE-M	Long Term Evolution Machine Type Communication
M2M	Machine to Machine
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MV	Mercury Vapor
NB-IoT	Narrow Band Internet of Things
NMT	Nordic Mobile Telephone
NSA	National Security Agency
NTC	Negative Temperature Coefficient
PCB	Printed Circuit Board
PMIC	Power Management Integrated Circuit

PTFE	Politetrafluoroetileno
RF	Radiofrecuencia
RTOS	Real Time Operative Sysyem
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
TACS	Total Access Communication System
THT	Through Hole Technology
TTL	Transistor-Transistor Logic
TTN	The Things Network
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UNB	Ultra NarrowBand
USB	Universal Serial Bus



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

MEMORIA

 NANOPHOTONICS
TECHNOLOGY
CENTER

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Concepción y planificación.....	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Comunicaciones M2M e Internet de las Cosas	2
1.1.2 Industria 4.0 y Ciudades Inteligentes	2
1.1.3 Evolución de las redes celulares.....	3
1.2 Objetivo del proyecto.....	10
1.3 Metodología.....	10
1.4 Evaluación de necesidades.....	11
1.4.1 Aplicación a iluminación inteligente	12
1.4.2 Requisitos del dispositivo.....	13
1.5 Análisis del estado del arte	14
1.5.1 Sistemas de conectividad de largo rango.....	14
1.5.2 Sistemas de Geoposicionamiento	23
1.5.3 Captación de energía.....	23
1.6 Análisis y evaluación de soluciones comerciales existentes	24
1.6.1 Wavecom Q52 Omni	24
1.6.2 Nodo LoRa de elektor.....	25
1.6.3 P-NUCLEO-LRWAN1	26
1.7 Definición de las Especificaciones de DISEÑO del producto (EDP)	27
1.8 Diseño conceptual del sistema	28
2. Diseño del producto	30
2.1 Selección de componentes y diseño eléctrico	30
2.1.1 Microcontrolador	31
2.1.2 Sistema de comunicaciones	37
2.1.3 Sistema de Geoposicionamiento.....	39
2.1.4 Sistema de Captación de Energía.....	41
2.1.5 Sistema de Gestión y Almacenamiento de Energía.....	42
2.2 Gestión de la energía	54
2.3 Precauciones contra descargas electrostáticas (ESD) y otras consideraciones	56
2.4 Desarrollo de firmware	58

2.5	Diseño del circuito impreso.....	59
2.5.1	Criterios y nomenclatura a utilizar para realización de documentación.	59
2.5.2	Generación de la <i>netlist</i>	60
2.5.3	Restricciones mecánicas.....	62
2.5.4	Criterios de fabricación y montaje	64
2.5.5	Consideraciones de Diseño Para Test (DFT).....	66
2.5.6	Disposición de los componentes (<i>layout</i>)	66
2.5.7	Particularidades del diseño	67
2.6	Montaje de la tarjeta.....	74
2.7	Resultado final.....	75
2.8	Pruebas en cámara climática	76
3.	Implementación de la solución	77
3.1	Fabricación de la maqueta de pruebas	77
3.1.1	Concepto	77
3.1.2	Descripción del sistema.....	77
3.1.3	Funcionamiento	78
3.2	Implementación del firmware en el nodo.....	79
3.3	Implementación del firmware en el servidor.....	80
3.4	Pruebas finales	80
4.	Conclusiones.....	82
5.	Bibliografía	84

1. CONCEPCIÓN Y PLANIFICACIÓN

1.1 Introducción

Las comunicaciones son un factor determinante para el ser humano. La falta de comunicación y conexión lastra el desarrollo del entorno y de la gente lo habita. Esto es algo que ocurre a todos los niveles, ya sea referido a infraestructura del transporte (ferrocarril, caminos, aeropuertos...) o referido a telecomunicaciones de voz y datos (teléfono, televisión, internet).

Antaño la gente que habitaba en el ámbito rural tenía muy difícil acceder a servicios como la educación y la salud. Esto se debía a la falta de infraestructuras básicas, situación de la que España siempre ha adolecido. Infraestructuras de transporte, como la red ferroviaria o las autopistas y autovías, siempre han sido sinónimo de modernidad, pues han posibilitado a lo largo de los años el acceso a los servicios y el desarrollo industrial. Las poblaciones próximas a carreteras nacionales o nudos ferroviarios han tenido facilidad para desarrollarse, mientras que las que se encontraban aisladas lo tenían mucho más difícil. Conscientes de esto, los gobernantes del momento llevaron a cabo ambiciosos planes para la mejora de las infraestructuras. Algunos de estos planes fueron la Ley general de ferrocarriles de 1877, el Plan Guadalhorce (1926), el Plan Badajoz (1952) o el programa REDIA (1967).

Desde sus comienzos las actividades industriales se han producido en lugares próximos a la materia prima utilizada, para posteriormente exportar a otro lugar la manufactura. Las mejoras en los transportes han hecho que la proximidad a la materia prima sea menos relevante, ya que se ha abaratado su transporte y por ello la distancia de la industria a la materia prima ya no es un factor crítico. En última instancia, las buenas comunicaciones han ocasionado el fenómeno de la globalización y han producido una deslocalización del tejido productivo, que busca unos costes de mano de obra menores.

Un ejemplo de ello se tiene en Sagunto. Los minerales extraídos en las minas de Ojos Negros (Sierra Menera, Teruel) eran transportados durante 200 km por ferrocarril hasta Sagunto. Gracias a las buenas conexiones ferroviarias y marítimas con las que contaba Sagunto resultaba sencillo transportar el carbón necesario hasta la fundición. El acero producido se extraía igualmente por ferrocarril y barco. Finalmente, en los años 70 su explotación dejó de ser rentable y comenzó el declive de esta industria, hasta dejar de producir acero definitivamente unos pocos años después. Este caso particular está englobado en el fenómeno de la desindustrialización. (Ruiz López, y otros, 2017)

En la actualidad la industria, además de facilidades para la manutención de mercancía, requiere una buena conexión digital. La tendencia actual es conectar entre sí todos los elementos del entorno productivo aprovechando las capacidades que ofrece internet. De esta forma se puede desarrollar una industria mucho más automatizada, con menos mano de obra. Con esto se permite lograr un proceso productivo más eficiente que suponga una ventaja competitiva respecto a la industria de países que basan su producción industrial en una mano de obra más económica. Esto es a lo que se conoce como Industria 4.0.

El análisis de la situación permite llegar a la conclusión de que en el siglo XXI la conectividad digital es tan importante para el progreso de la industria como lo fueron las redes de transporte en los siglos XIX y XX. Sin embargo, igual que ocurrió entonces, no todos los lugares están igual de bien comunicados. A la falta de infraestructuras clásicas que algunos núcleos habitados de zonas rurales siempre han sufrido se ha sumado la falta de infraestructura para soportar las telecomunicaciones de la que los medios han empezado a hacerse eco recientemente. (Lorenzo, 2020)

1.1.1 Comunicaciones M2M e Internet de las Cosas

El concepto de comunicaciones M2M (máquina-máquina), parte de la necesidad de gestionar dispositivos sin intervención humana y de manera remota, requiriendo para ello una red de telecomunicaciones.

En el pasado las redes de comunicaciones que abarcaran grandes áreas eran escasas y solo disponibles para un pequeño número de usuarios situados en universidades o instituciones gubernamentales (ARPANET). Con la disponibilidad de la gran red que es internet, que permite interconectar cualquier parte del mundo, sumado al bajo precio de los semiconductores y de la electrónica en general, es posible plantearse la interconexión de un número mucho mayor de dispositivos a un coste muy bajo. El resultado de esta evolución de las conexiones máquina-máquina, que la aparición de internet ha permitido, es el Internet de las Cosas, más conocido por su nombre en inglés *Internet of things*, o por sus siglas IoT.

Cabe destacar, a modo de anécdota, el primer dispositivo al que pudo llamarse “cosa” conectada a una red; se trataba de una máquina de Coca-Cola de la universidad de Carnegie Mellon. David Nichols, un estudiante de esa universidad, tuvo la idea de instalar en la máquina una tarjeta que comunicaba el estado de los refrescos a un gateway que estaba conectado a ARPANET. De esta manera cualquier persona con acceso a la red de la universidad o a ARPANET podía saber en qué momento comprar un refresco que estuviera frío.

Hoy en día pueden encontrarse en el mercado lavadoras, frigoríficos y demás electrodomésticos de línea blanca que se encuentran conectados a internet; a la vez que se habla de coches autónomos, de ciudades inteligentes y de Industria 4.0. Sin embargo, aunque todos ellos se engloban en el concepto de IoT, cada uno tiene unos requisitos de conectividad muy distintos. Los electrodomésticos se encuentran estacionarios en el hogar y seguramente tengan acceso a internet a través de una red WiFi, mientras que los coches autónomos son móviles y necesitarán estar conectados a internet a través de redes con una cobertura mayor, por ejemplo, redes celulares. Las redes celulares de quinta generación ayudarán a conectar dispositivos que hasta ahora no tenían la posibilidad de hacerlo.

1.1.2 Industria 4.0 y Ciudades Inteligentes

Esta evolución en el campo de las comunicaciones M2M ha permitido el desarrollo de una nueva industria, la que se conoce como Industria 4.0. De la misma manera, estos avances pueden utilizarse en la ciudad.

Al igual que ocurre dentro de una fábrica, una ciudad está compuesta por una gran cantidad de subsistemas. Estos sistemas son complejos de gestionar y puede ser interesante dotarlos de cierta inteligencia. Un ejemplo de ello son los contadores inteligentes. La compañía eléctrica

factura a cada abonado, entre otras cosas, en función de la energía consumida. En un primer momento un operario se desplazaba periódicamente hasta todas las instalaciones con el fin de tomar lectura de los contadores y poder facturar a los usuarios. Con los contadores inteligentes las medidas se toman de manera automática utilizando la telelectura, con el consiguiente ahorro económico. Por su parte, el contador manda el dato de consumo eléctrico a través de una red de comunicaciones, generalmente a través del cableado eléctrico (*Power Line Communications*), hasta la estación base que recibe los datos. Puesto que los datos de consumo se conocen en tiempo real, se puede facturar a los clientes en función de las franjas horarias, lo cual contribuye a mejorar la calidad del servicio. Esta integración de la gestión eléctrica con las telecomunicaciones da lugar al término *Smart Grid* y es algo que no hubiera sido posible si no se hubiese alcanzado cierta madurez en el desarrollo de las telecomunicaciones que permiten la comunicación máquina-máquina y en particular, las redes celulares.

Aunque el anterior ejemplo representa una aplicación importante, no es la única. Existen en las ciudades otros sistemas que están siendo automatizados paulatinamente, como la gestión de residuos, la iluminación inteligente o el riego automático, entre otros.

1.1.3 Evolución de las redes celulares

El problema de la conectividad en el entorno rural es una situación que se lleva produciendo desde los orígenes de la telefonía.

Durante los años en los que la empresa Telefónica, en aquel momento conocida como CTNE, operaba como una empresa pública en régimen de monopolio, se intentó garantizar que las líneas telefónicas convencionales, por su condición de servicio público básico, llegaran a todos los lugares del territorio nacional; a pesar de que no resultaba económicamente rentable.

En el año 1982 se introdujo la telefonía móvil analógica 1G en España. El primer sistema implementado fue el TMA-450 (Telefonía Móvil Automática en 450MHz), que estaba basado en el sistema NMT-450 utilizado con éxito en los países nórdicos desde el año anterior. Aunque este sistema permitía un máximo de en torno a 100.000 abonados y en un origen fue implementado en las principales ciudades, su cobertura fue paulatinamente expandiéndose por las zonas rurales. El incremento de la cobertura por el territorio se acentuó a partir del año 1990, en el que se introdujo el más avanzado sistema TMA-900, basado en tecnología TACS y que permitía un número máximo de 1 millón de abonados. (Pérez Yuste, 2002)

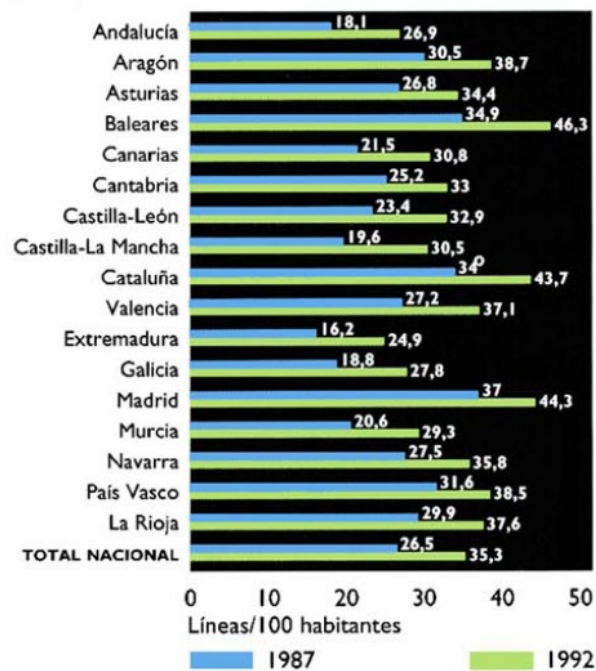


Figura 1. Penetración del servicio telefónico básico por comunidades autónomas en el periodo 1987-1992 (Telefónica, 1992).

Este servicio de telefonía, conocido comercialmente como *Moviline*, permitió democratizar la telefonía móvil en España, que hasta entonces estaba restringida a usos profesionales e institucionales (Infante, 2002). En el año 1996 se alcanzó virtualmente la cobertura total en el territorio nacional (Figura 2). Esto permitió utilizar la telefonía móvil para crear nuevas líneas telefónicas fijas en los lugares en los que hasta ese momento no había sido posible llevar una línea con par telefónico de cobre. Para ello se instalaba un terminal celular fijo en un lugar con cobertura al que era posible conectar directamente los teléfonos de la casa. Este sistema se denominaba Telefonía Rural por Acceso Celular (TRAC). (El País, 2001)

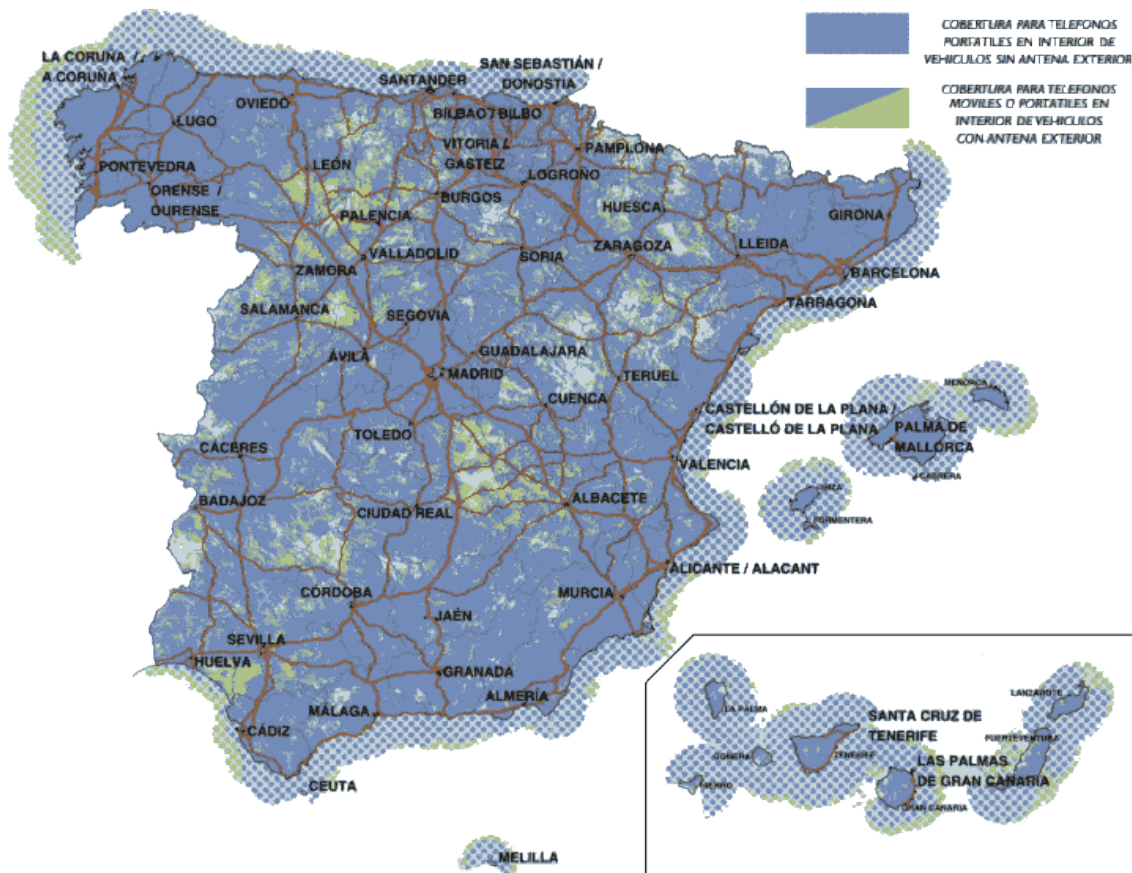


Figura 2. Mapa de cobertura de la red TMA-900A en el año 1996 (Telefónica, 1996).

Hasta ese momento el servicio que se proporcionaba con este tipo de redes de comunicaciones era exclusivamente de voz. Sin embargo, la aparición de las nuevas tecnologías e internet a mediados de los años 90 permitió hacer uso de las redes de telefonía móvil de primera generación para transmitir datos mediante uso de módem. Aunque esa transmisión se hacía con una velocidad limitada a 2400 baudios, debido a la baja calidad de audio del enlace y con riesgo de que las comunicaciones fueran interceptadas, ya que las redes móviles analógicas no estaban encriptadas.

De manera paralela surgieron redes y protocolos específicos para datos, cómo el sistema CDPD, que permitía hacer uso de los canales de voz no utilizados por el sistema de telefonía americano AMPS para transmitir datos. También se crearon otros sistemas totalmente diferenciados como

dataTAC o *Mobitex*. Estos sistemas no fueron ampliamente utilizados por el público general pero sí que tuvieron un limitado éxito para aplicaciones de comunicación máquina-máquina M2M. Estos sistemas se mantuvieron en activo hasta que la introducción de las redes de telefonía digitales de segunda generación provocó el ocaso de las redes analógicas.

La forma de transmitir datos cambió con la introducción de la telefonía móvil de segunda generación, particularmente GSM en España. Estas redes, aunque no pensadas originalmente para transmisión de datos, pues habían sido ideadas para transmisión de voz, ya hacían uso de modulaciones digitales que simplificaban la transmisión de datos.

Utilizar un módem para transmisión de datos dejó de ser una posibilidad. Estas redes habían sido diseñadas para transmitir voz y la compresión de audio utilizada en este tipo de redes digitales provoca que los patrones de la modulación que realizan los módem se pierdan. Sin embargo, utilizando la tecnología CSD era posible acceder directamente a la capa de datos del sistema GSM. Utilizando CSD podían alcanzarse velocidades de 9.6 kbits/s (Telefónica, 1995).

Posteriormente fueron desarrollados los estándares GPRS y EDGE. Para el desarrollo de esos estándares se puso el foco en la transmisión de datos y funcionan como capas superpuestas sobre GSM para transmitir datos, mientras que GSM se mantiene para transmitir voz exclusivamente. Conforme la tecnología ha ido avanzando se han conseguido mejores velocidades y una mejoría en el precio de las tarifas. Sin embargo, más allá de la bajada de precios que ha supuesto la introducción de la tecnología 4G no se ha producido un cambio sustancial en la manera en la que se accede a la red.

En el caso de España, el servicio de telefonía móvil digital GSM se comenzó a comercializar en el año 1995 por parte de Telefónica creando la marca *Movistar*, actualizando al estándar GSM las estaciones base de telefonía, que estaban situadas en lugares estratégicos del panorama nacional y que hasta ese momento estaban siendo empleadas para dar servicio a la red móvil analógica *Moviline*. Esto facilitó en pocos años el despliegue total del servicio GSM de *Movistar*. De esta forma se dotó de conectividad GSM a la totalidad del territorio nacional, como se aprecia en la Figura 3. Además de a internet, GSM permitía la conexión a redes de comunicaciones nacionales más antiguas como la red X.25 (IBERPAC) (Telefónica, 1995).

Paralelamente, con la liberalización del mercado de la telefonía móvil surgió la empresa Airtel (actual Vodafone) como competencia en el mercado de telefonía móvil. Sin embargo, Airtel no pudo hacer uso de las estaciones base de telefonía ya existentes, que eran propiedad de Telefónica, por lo que tuvo que desplegar su propia red. Como era previsible por motivos económicos, Airtel desplegó su red comenzando por las grandes ciudades, pues es en estas donde existe la mayor cantidad de clientes potenciales. Por el contrario, ni Airtel ni otras compañías que surgieron extendieron su red en zonas con baja densidad poblacional. En estas zonas hay un reducido número de potenciales clientes y las operaciones de las compañías de telecomunicaciones resultan poco rentables. (Figura 4)



Figura 3. Cobertura GSM actual del operador Movistar en España (GSMA).



Figura 4. Cobertura GSM actual del operador Vodafone en España (GSMA).



Figura 5. Cobertura 4G actual del operador Movistar en España (Movistar).

De esta forma, la red GSM de Telefónica ha quedado en la actualidad como la única red de telefonía con una cobertura total a lo largo y ancho de todo el territorio nacional; situación que no ha cambiado durante más de 20 años. A pesar de tener una capacidad muy limitada para transmisión de datos, esta red tiene una gran utilidad en aplicaciones para comunicaciones máquina-máquina; aplicaciones que requieren gestionar y supervisar de una manera remota y desatendida sistemas o instalaciones automatizadas y que requieren de la transmisión de baja cantidad de datos. Algunos ejemplos de esto son: Sistemas de intrusión, contadores de agua y luz, terminales de punto de venta, usos agrícolas o máquinas de venta automática. En las zonas rurales de España con baja densidad poblacional la conectividad GSM resulta vital pues es la única alternativa de la que se dispone.



Figura 6. Sistema CityPaq de Correos para entrega automática de paquetería. Requiere conectividad GPRS para funcionar (Correos, 2017).

El futuro de las redes de comunicaciones celulares: 5G

Actualmente se están desplegando las redes de comunicaciones celulares de quinta generación, llamadas 5G. Las redes 5G engloban tanto tecnologías diseñadas con el objetivo de aumentar la velocidad de los usuarios y reducir su latencia (el tiempo transcurrido desde que se transmite un dato hasta que se recibe), como otras cuyo objetivo es permitir la conexión a internet de un gran número de dispositivos (NB-IoT, LTE-M y EC-GSM IoT), lo que contribuiría a hacer más grande el Internet de las Cosas.

Para alcanzar estas metas se requiere actualizar la red que interconecta las estaciones base de telefonía. Esta red, conocida como red troncal, interconecta actualmente las estaciones base con cableado de pares de cobre. Sustituir el cableado por fibra óptica, con mayor capacidad de transmisión de datos, permitiría velocidades de conexión mucho mayores. También contribuiría al objetivo de reducir la latencia de la red.

Existen grandes expectativas al respecto y se espera que estas redes ayuden a llevar la conectividad a internet a todos los lugares a la vez que reduzcan todavía más el coste de los datos tal y como hicieron las redes 4G. En la Figura 7 puede verse la tendencia que ha seguido el coste por MB desde el año 2012 a 2016, fechas que coinciden con la introducción de la tecnología 4G. Los usuarios de estas redes podrán disponer de grandes cantidades de datos a un precio menor, sin embargo esto también tiene su contrapartida; la cantidad promedio de ingresos por usuario va a continuar con una tendencia descendente tal y como se representa en la Figura 7 (Deloitte, 2018).

When indexed, the revenue per MB has declined the fastest in Asia, as new technologies and networks were adopted during the period.

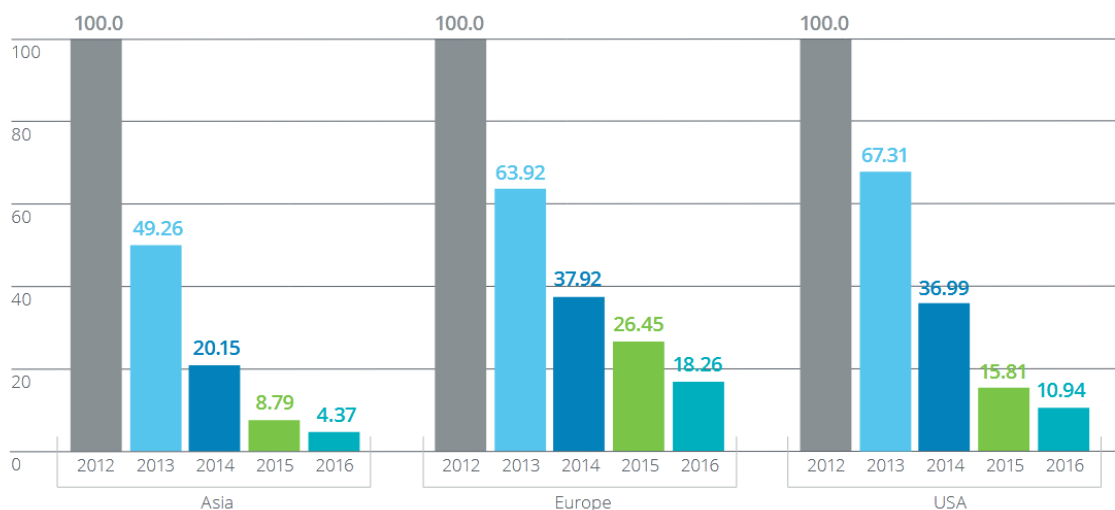


Figura 7. Ingresos de las empresas de telecomunicaciones ponderados por unidad de datos en los distintos continentes (Deloitte, 2018).

When indexed, ARPUS in Asia and the United States have declined the same amount from 2012 to 2016.

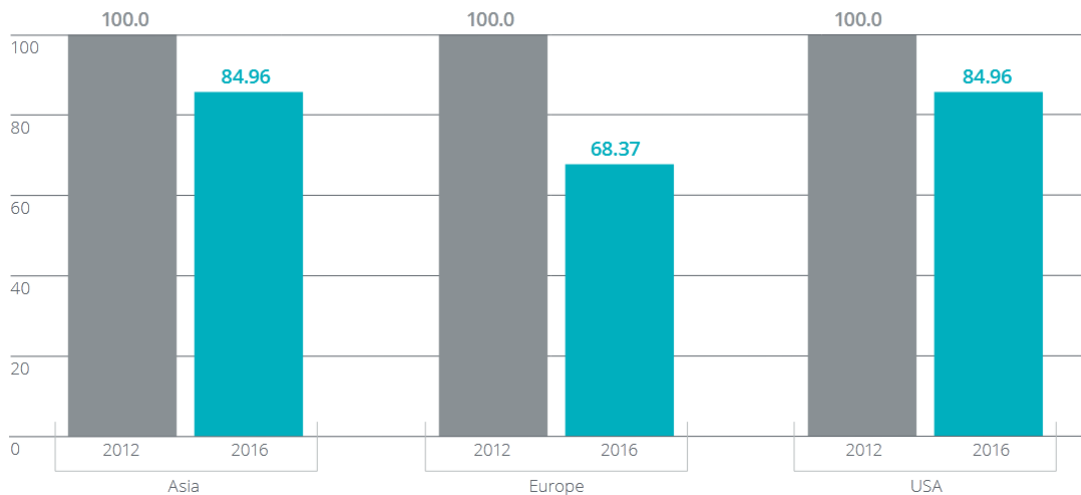


Figura 8. Promedio de ingresos por usuario del sector de las telecomunicaciones en los distintos continentes (Deloitte, 2018).

Esto plantea ciertas dificultades para su implantación en lugares en los que la densidad de clientes es baja y la rentabilidad de la explotación se pone en entredicho, razón por la cual no se espera que las redes 5G solucionen los problemas de conectividad de los que adolece la España vacía a corto plazo; las zonas rurales seguirán dependiendo de redes de segunda generación para la conectividad móvil. Sin embargo, puesto que en Europa la tecnología GSM de 2ª generación goza de una gran penetración en el territorio, será fácil que, en conjunción con el despliegue de otras redes, estas se actualicen también al estándar EC-GSM-IoT aprovechando la mayor parte de la infraestructura existente. Esto hará su explotación más interesante que otro tipo de redes cuyo despliegue haya de hacerse desde cero y garantizará, aunque a baja velocidad, la conectividad a internet en todo el territorio español, mejorando incluso la cobertura de GSM.

La situación actual

En algunos lugares de la geografía española que se encuentran alejados de las grandes ciudades y de sus zonas metropolitanas se hace difícil la conexión a internet. Por una parte, los operadores de telecomunicaciones no ofertan servicios de banda ancha con lo que la conectividad a internet de las personas es muy limitada como para hacer uso multimedia de él. Por otra parte, las únicas redes móviles disponibles en esos lugares son las redes 2G anteriormente mencionadas (GSM, GPRS y EDGE). Estas redes tienen poca capacidad para hacer un uso multimedia de ellas, pero son suficientes para conexiones con menor demanda de datos.

Muchas de las aplicaciones de las comunicaciones máquina-máquina solo necesitan transmitir una pequeña cantidad de datos para conocer temperatura, posición o estado de algún sistema y poder gestionarlo de manera remota; no necesitan transmitir video. Para estas aplicaciones, tradicionalmente ha bastado con redes celulares de baja velocidad. Sin embargo, el futuro de estas redes es incierto en el corto plazo y, debido a las características particulares de la orografía pueden existir pequeñas islas sin cobertura. Además, si se prevé conectar un número mucho mayor de dispositivos inteligentes a internet las redes 2G quedarán saturadas.

Aunque las redes 2G han sido útiles como una solución provisional para ese cometido, pero estas redes no fueron originalmente concebidas para conectar un gran número de dispositivos de manera simultánea. Esta es un requisito indispensable para convertir los pueblos del entorno rural en ciudades inteligentes. Sin embargo, como se ha expuesto en el apartado anterior, las redes de quinta generación no suponen una solución inmediata al problema.

La solución a la que han recurrido los municipios con estos problemas de conectividad ha sido contratar servicios de internet por satélite o crear sus propias redes mediante radioenlaces; soluciones costosas y poco efectivas (El País, 2003). En cuanto a conectividad celular, los usuarios situados en estas zonas tienen que resignarse a utilizar redes celulares de segunda generación, salvo en los lugares en los que ni siquiera existe cobertura celular.

Por tanto, existen en la geografía puntos en los que no existe ninguna conectividad, de modo que la telegestión o telemando de estas instalaciones no resulta sencillo. Esta posibilidad es interesante teniendo en cuenta que existen multitud de aplicaciones en el mundo agrario que podrían beneficiarse, por lo que debe buscarse una solución.

1.2 Objetivo del proyecto

El objetivo del siguiente proyecto es diseñar un dispositivo autónomo que pueda permanecer desatendido durante largos periodos de tiempo. Este dispositivo tiene que permitir conectividad al Internet de las Cosas (IoT) para intercambiar datos de baja densidad en lugares remotos en los que no exista conectividad a internet a través de redes de comunicaciones convencionales (telefonía celular o acceso a internet por cable) ni tampoco acceso a la red eléctrica. La solución adoptada debe ser escalable e integrada, a la vez que flexible y no ligada a una aplicación específica. Un diseño polivalente podría adaptarse a multitud de casos de uso

1.3 Metodología

Para la realización del proyecto se sigue un esquema simplificado de desarrollo de producto. Este esquema sigue el orden propuesto en el libro de apuntes de la asignatura de proyectos del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (Departamento de Proyectos de Ingeniería UPV, 2015).

En un primer momento se procede a evaluar las necesidades de potenciales clientes para, posteriormente, definir los requisitos del producto y las especificaciones de diseño del producto (EDP) en los apartados 1.4 y 1.7. Una vez hecho esto se realiza en el apartado 1.5 un análisis de las innovaciones aplicables al producto y de los productos existentes en el mercado en el apartado 1.6. Finalmente se concluye esta etapa realizando un diseño conceptual del producto.

En el capítulo 2 se aborda el diseño de detalle del producto a partir del diseño conceptual realizado en el apartado 1.8, empezando por la selección de componentes y terminando con el diseño del circuito impreso, que se considera en sí mismo el producto final del proyecto.

Finalmente, en el capítulo 3 se desarrolla una aplicación que permite demostrar y evaluar las capacidades del dispositivo diseñado.

Se ha estudiado la subdivisión del proyecto en distintos elementos para la realización de una EDT. La EDT, o estructura de descomposición del trabajo, es un esquema que divide la totalidad

del proyecto en entregables de menor nivel cuya medición resulta más sencilla. Debe tenerse en cuenta que los elementos de la EDT tienen que centrarse en los entregables, el producto del trabajo, y no en el trabajo en sí. En un nivel jerárquico inferior de esos entregables se encuentran los paquetes de trabajo (U.S. Department of Defense, 2005).

La EDT realizada se toma como base para la realización del proyecto y está localizada en la primera página del Anexo A. Se tiene en cuenta que la EDT va ligada al proyecto y sufre modificaciones durante su tiempo de vida, debido a las circunstancias cambiantes de este. Este documento ha facilitado analizar los procesos clave y descomponerlos en tareas más pequeñas, lo que ha permitido diseñar un programa para organizar temporalmente las tareas del proyecto. La programación temporal del proyecto se muestra en el diagrama de Gantt de la segunda página del Anexo A.

El índice de la memoria se ha intentado adaptar a los elementos de la EDT y se presenta de una manera secuencial. Sin embargo, el desarrollo del proyecto no ha seguido fielmente ese orden, ya que en algunas ocasiones ha sido necesario avanzar en una fase posterior del proyecto para poder terminar una fase previa. Un ejemplo de ello se tiene en el diseño del circuito impreso; no se han podido seleccionar todos los componentes hasta que no se han presentado en el software de diseño y se ha comprobado que no existen incompatibilidades mecánicas entre ellos.

1.4 Evaluación de necesidades

A continuación, se listan algunos ejemplos de aplicación para los que este tipo de dispositivo podría resultar interesante.

Agricultura y ganadería:

- Dispositivo de seguimiento para cabezas de ganado
- Telemando de válvulas para administración de fertilizantes y distribución de regadío en explotaciones agrarias
- Medición de condiciones del terreno en campos de cultivo que permitan detectar sequías
- Medición de condiciones ambientales instantáneas para prevenir proliferación hongos en el cultivo de la vid, como el Mildiu y la Botritis.
- Sistemas de seguridad para evitar robo de cosechas o colmenas de abejas
- Alerta temprana de incendios
- Alerta temprana de inundaciones

Ciudades inteligentes o *Smart Cities*:

- Sistemas de control de aparcamiento
- Luminarias inteligentes
- Estaciones meteorológicas
- Monitorización CO2 en locales comerciales
- Nodos para *relaying* información en entornos rurales, utilizando una topología de red de tipo malla (*mesh network*)

Los usos anteriormente planteados requieren que el dispositivo diseñado incorpore ciertas características, capacidades y funcionalidades para cada uso. Estas funcionalidades se traducirán posteriormente a especificaciones técnicas.

1.4.1 Aplicación a iluminación inteligente

Los ayuntamientos tienen que hacer frente a un elevado consumo de energía, del cual el destinado a iluminación representa un elevado porcentaje (IDAE, 2017). Por esta razón la eficiencia energética en el alumbrado público se lleva buscando desde hace tiempo. En los años 90 la gran mayoría de luminarias destinadas al alumbrado público utilizaban lámparas de vapor de mercurio de alta presión (MV). Las lámparas que hacían uso de esta tecnología eran eficientes y duraderas si se comparan con lámparas incandescentes del momento. Alcanzaban un rendimiento lumínico de hasta 60 lm/W y un tiempo de vida de 24000 h. Sus desventajas eran una baja calidad de color y un rendimiento no lo suficientemente alto, si se comparan con los estándares actuales, como para justificar el contenido de mercurio. Puesto que existían alternativas para su sustitución su uso se ha ido prohibiendo paulatinamente (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Department of Energy, 2015)

Buscando reducir el consumo energético, a principios de los años 2000 se comenzaron a reemplazar en muchos municipios las lámparas MV por lámparas de sodio de alta presión (HPS). A diferencia de las anteriores este tipo de lámparas si tiene una eficiencia lumínica realmente alta; de hasta 140 lm/w para las lámparas de mayor tamaño (Edison Tech Center, 2013). A pesar de que la calidad de la reproducción cromática no es buena, este tipo de lámparas si son aptas para iluminación viaria, donde el color no es importante.

La aparición de nuevas tecnologías de iluminación como las lámparas de Halogenuros metálicos (una evolución de las lámparas de vapor de mercurio) o las lámparas LED de potencia ha aumentado el abanico disponible de sistemas de iluminación. Esto ha permitido reemplazar a las lámparas HPS en ciertas aplicaciones por otro tipo de lámparas más aptas.

Las lámparas de halogenuros metálicos se utilizan en algunas luminarias de alta potencia de vías públicas residenciales. En estas aplicaciones se desea una buena representación cromática con un buen rendimiento lumínico. En cuanto a los sistemas de iluminación LED se están utilizando para usos de alumbrado público de baja y media potencia.

A diferencia del resto de tecnologías mencionadas anteriormente, que son lámparas de descarga de alta intensidad, los diodos LED son semiconductores. Las lámparas de descarga de alta intensidad necesitan un tiempo desde que arrancan hasta que se establece el arco eléctrico y lucen con la intensidad nominal. Por el contrario, las lámparas de tecnología LED lucen de manera instantánea en cuanto se produce un flujo de corriente a través de ellas, esto facilita su regulación.

El siguiente paso para continuar el camino de la iluminación eficiente sería utilizar una luminaria inteligente que solo se encienda cuando sea necesario; cuando detecte el paso de personas o vehículos en el tramo o sector que ilumina. Esto representaría un ahorro energético y económico considerable que va en consonancia con el clima de ahorro energético actual impuesto por las directivas de la unión europea (Comisión Europea - Dirección General de Redes de Comunicación, Contenido y Tecnología, 2013).

A modo de demostración del dispositivo diseñado, en el presente proyecto se va a aplicar el dispositivo para luminarias inteligentes (*Smart lighting*). En esta aplicación, luminarias LED existentes podrán convertirse en luminarias inteligentes con la adición del dispositivo diseñado. Al proceso de actualizar elementos existentes con funcionalidades con las que no contaban cuando fueron concebidos se lo conoce como *retrofitting*.

Una de las ventajas que se pretende conseguir dotando de conectividad IoT a las luminarias actuales es la de poder conocer el estado de estas en tiempo real. Algunos parámetros que interesaría medir en una luminaria que dispusiera de batería serían la capacidad de la batería, tensión de batería y panel LED. Dotar a las luminarias de inteligencia también puede servir para operarlas remotamente y reducir el coste energético. Desde un servidor externo se puede ordenar el momento adecuado para comenzar la carga de la batería de la luminaria. Esto se haría, conociendo el precio de la energía eléctrica en tiempo real, en el momento en el que el precio por unidad de energía sea más bajo. Otra funcionalidad podría ser reducir la intensidad de las luminarias cuando no se utilizan, pues en muchas ocasiones las luminarias permanecen encendidas consumiendo energía y acortando su tiempo de vida cuando no hay nadie cerca. Estas dos medidas representan un ahorro económico, fruto de dotar de inteligencia a la luminaria.

Concretamente, se utilizará el dispositivo diseñado para la gestión remota de una luminaria de tecnología LED para alumbrado urbano y 50 W de potencia. Para ello se actualizará la luminaria existente con el dispositivo diseñado, dotando a la luminaria de inteligencia con ella. La luminaria estará conectada a la red eléctrica, pero podrá disponer también de una batería que se cargue desde la red eléctrica en función del precio instantáneo de la energía eléctrica. La importancia de incorporar una batería que se cargue dependerá del ahorro económico que se pueda conseguir con ella al cargarla en los periodos valle.

Cada luminaria será un nodo de la red y los distintos nodos se podrán conectar a IoT a través de un servidor o gateway.

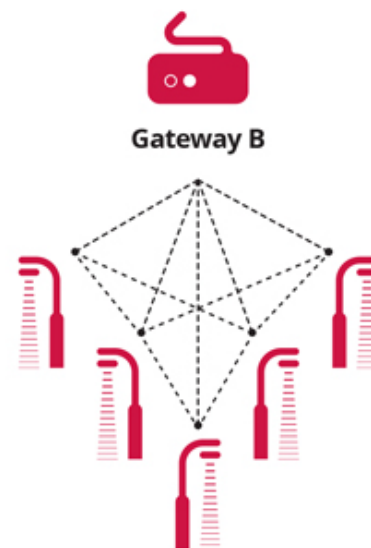


Figura 9. Esquema de la tipología de la red (TALQ Consortium, 2018).

1.4.2 Requisitos del dispositivo

De esta aplicación y de las expuestas anteriormente se puede extraer la idea las capacidades con las que debe contar el dispositivo que se va a diseñar.

- Captación de energía: Para ser un dispositivo autónomo no debe depender de fuentes de energía externas, debe suministrarse su propia energía.
- Almacenamiento de energía: Debe poder almacenar energía. Este reservorio se utilizará cuando el suministro principal de energía no se encuentre disponible.
- Fuente de alimentación: El dispositivo debe ser capaz de funcionar con un suministro de energía externo, por si este se encontrara disponible.

- **Inteligencia:** El dispositivo deberá estar dotado de cierta inteligencia para poder procesar tanto la información del entorno como la que reciba a distancia. También deberá poder automatizar el comportamiento de sus entradas y salidas tanto digitales como analógicas, que servirán para actuar sobre sistemas externos.
- **Comunicaciones:** Debe de disponer de algún tipo de sistema de comunicaciones de larga distancia.
- **Geoposicionamiento:** En algunas aplicaciones resulta de suma importancia conocer la posición instantánea del dispositivo.

Para esta aplicación no será necesaria la geolocalización, pues las luminarias se encontrarán en todo momento en un lugar fijo cuya posición ya se conoce. Sin embargo, a pesar de que no se haga uso de ella, el dispositivo diseñado dispondrá de dicha capacidad.

Para que el dispositivo diseñado sea realmente un dispositivo polivalente y apto para distintos escenarios debe considerarse la posibilidad de expansión. Siempre pensando en el objetivo de poder utilizarlo para aplicaciones alternativas. Esto significa que las entradas y salidas del dispositivo no estarán limitadas a las funciones requeridas por la luminaria, como son el encendido y apagado, o la detección de presencia.

Se estima que la tirada de fabricación pueda ser de 5000 unidades de tarjetas para actualizar luminarias, que serán los nodos de la red. El tiempo de vida de las luminarias se estima en unos 10 años. Esto hace que resulte más interesante el desarrollo de una solución integrada con *hardware* específico que sea diseñado para esta aplicación concreta.

Se propone una solución basada en un microcontrolador que incluya las funcionalidades deseadas, en contraposición a recurrir a una tarjeta de desarrollo comercial *off the shelf* como Beaglebone, Raspberry Pi, o Arduino. Sí que se utilizará la tarjeta Nucleo64 con microcontrolador STM-32 para el desarrollo de un prototipo funcional en el que se pueda probar el firmware desarrollado.

Se requerirá un número menor de servidores o *gateways*, por tanto, para esta función si tiene interés buscar una solución que ya exista en el mercado; los costes de desarrollo serían demasiado altos comparados con los costes de adopción de la solución comercial.

1.5 Análisis del estado del arte

En este apartado de la memoria se analizan y seleccionan las distintas tecnologías disponibles en el mercado que ayudan a cumplir las funciones descritas en el apartado anterior.

1.5.1 Sistemas de conectividad de largo rango

Para poder seleccionar los sistemas de conectividad más aptos para ser integrados en el dispositivo diseñado deben plantearse distintas alternativas y conocer las capacidades de cada una de las distintas tecnologías. De ellas se seleccionará la que más se ajuste a los requerimientos de la aplicación. Se hace gran énfasis en este apartado ya que la elección del sistema de comunicaciones es una parte fundamental del proyecto; existe una gran diferencia en las funcionalidades aportadas por las distintas tecnologías.

A continuación, se presentan los distintos tipos de sistemas y tecnologías que pueden cubrir las capacidades de comunicación. Estas tecnologías pueden clasificarse en distintas categorías.

- Tecnologías LPWAN ISM
- Tecnologías Celulares
 - 2G
 - LPWAN Celulares

Tecnologías LPWAN en bandas ISM

Las tecnologías LPWAN que operan en bandas ISM tienen la peculiaridad de tener un largo alcance, similar a las redes celulares, pero con un bajo consumo de energía y tasas de transferencia de datos sensiblemente menores. Tienen la ventaja de que estas bandas *ISM* no están reguladas, por lo que se pueden utilizar sin licencia siempre y cuando se respeten unos dictámenes de la ETSI. Además, requieren una infraestructura mínima para funcionar en comparación con otros sistemas.

Esas particularidades hacen este tipo de redes adecuadas para sistemas que no requieren transferir video o audio, como redes de sensores.

- **Sigfox**

La empresa Sigfox es una *Startup* francesa surgida en el año 2009. Esta empresa ha desarrollado una red privada que opera en banda ISM con estándares y componentes propietarios cuyo uso oferta a sus clientes. Ofrece paquetes comerciales y precios en función del número de dispositivos conectados.

Esta red está orientada a aplicaciones M2M e IoT que requieren conectar una gran cantidad de dispositivos a una baja velocidad y con bajo tráfico, un ejemplo de aplicación son las redes de sensores.

Sigfox opera en la banda ISM de 868 MHz (Europa) y utiliza tecnología de banda estrecha (UNB) combinada con modulaciones de desplazamiento de frecuencia DBPSK y GFSK

- **LoRaWAN**

LoRaWAN es un protocolo de red que permite conectar dispositivos a internet a través de largas distancias y con un bajo consumo. Se trata de un estándar abierto basado la técnica de modulación propietaria LoRa, que solo requiere la utilización de los chips desarrollados por la empresa Semtech. Generalmente cualquier dispositivo capaz de utilizar la modulación LoRa puede conectarse a una red LoRaWAN. La modulación LoRa está basada en la modulación CSS.

Existen varias redes públicas, una de ellas es la red TTN, que otorga muchas facilidades para conectar cualquier dispositivo a la red siempre y cuando exista un *gateway* en el entorno. Su desventaja es que para su utilización se deben seguir unas estrictas normas, 10 mensajes de bajada de la red por nodo al día y 30 s de tiempo de comunicación por nodo, entre otras.

Tecnologías Celulares

Se trata de tecnologías que utilizan la infraestructura de la red de telefonía móvil. Transmiten y reciben una señal desde las estaciones base de telefonía, que son las células. Las tecnologías celulares que se valoran en este apartado incluyen tanto las redes 2G como las LPWAN celulares (LTE-M, EC-GSM, NB-IoT) que acompañan al 5G en su despliegue.

En la introducción ya se han mencionado las características de las redes 2G, tienen una gran trayectoria, pero es una tecnología que en su versión más primitiva tiene 30 años de antigüedad y sus capacidades son limitadas.

En cuanto a las redes LPWA celulares, en la actualidad no tienen una gran implantación fuera de zonas urbanas y tampoco se prevé que en el futuro cercano se impongan. Por el momento la única tecnología que dispone de cobertura en el 100% del territorio español es la red 2G GSM, cuyo desmantelamiento está previsto a medio plazo.

Análisis y previsiones de futuro

Actualmente, la mayoría de las comunicaciones que se entienden por IoT están basadas en sistemas de tecnología propietaria. Estos sistemas, conocidos como *Legacy M2M*, existían antes de la explosión del sector IoT y representaban más de un 71% de la cuota de mercado a fecha de julio de 2019. Está previsto que esta cuota se vaya reduciendo a lo largo de los años, conforme se implanten tecnologías alternativas y los dispositivos basados en estas redes terminen su vida útil (Blackman, 2019).

Las comunicaciones M2M o máquina-máquina, engloban tanto conexiones sin cables (*Wireless*) como cableadas. La mayoría de estas comunicaciones sin cables son posibilitadas por la tecnología GSM, pues, como se ha mencionado en la introducción, su principal ventaja es la amplia cobertura de la que dispone esta tecnología. Estos sistemas de comunicación M2M se llevan integrando desde hace mucho tiempo; algunos ejemplos de ello son las máquinas de venta automática en las que se informa del inventario, cajeros automáticos que reciben autorización de la red bancaria para dispensar dinero, sistemas de telemática industrial o contadores de agua y energía eléctrica con capacidad de telemedida.

Al inicio del año 2018 había 5 millones de líneas celulares M2M en España (Redacción RedesTelecom, 2018) que usaban numeración normal. Esta cifra ha ido creciendo año a año desde hace un tiempo, por lo que en el año 2010 se habilitó el rango de numeración que comienza por el prefijo 59; específico para las líneas telefónicas M2M. Este nuevo prefijo forma un número telefónico de 13 dígitos, aumentando la cantidad de líneas telefónicas posibles. Esto ha ayudado a incrementar en gran medida la cantidad de dispositivos conectados desde su implantación, especialmente en los últimos años (Figura 10).

Con el decremento de los costes de la red y de los dispositivos y el abaratamiento de la electrónica ha surgido la posibilidad de disponer de redes con un alcance similar al que se consigue con redes 2G, pero con un consumo de energía más reducido que estas. Estas nuevas redes de comunicación, denominadas LPWAN, son una solución *Ad hoc* para intercomunicar con un bajo consumo de energía dispositivos inteligentes que no requieren altas tasas de transferencia de datos. Esta es una tarea que hasta el momento ha venido siendo realizada por las redes celulares 2G, pero a diferencia de estas, las redes LPWAN tienen capacidad para comunicar un mayor número de dispositivos con menor coste energético y mayor cobertura.

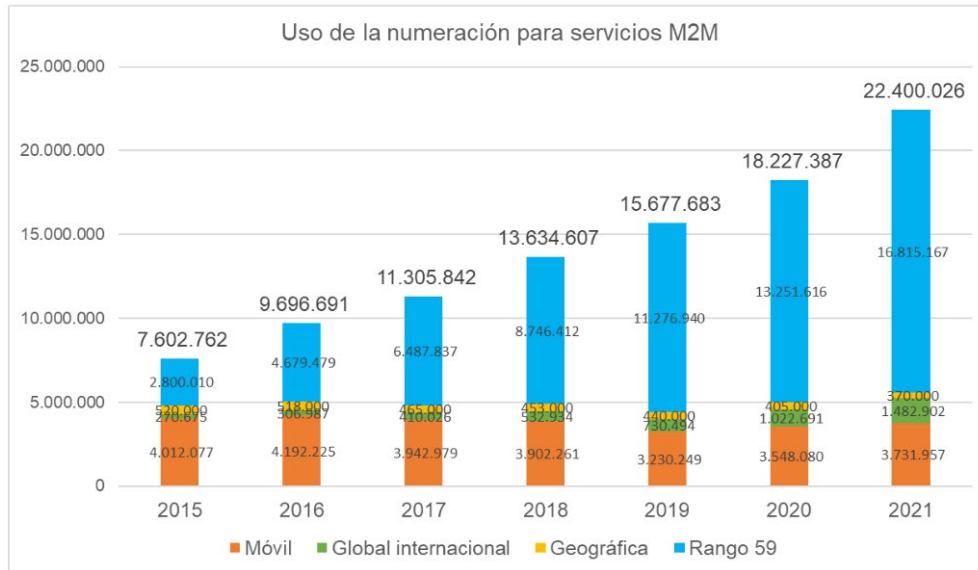


Figura 10. Cantidad de números en uso para servicios M2M según el tipo de numeración empleada. Los años 2020 y 2021 corresponden a previsiones de uso (Comision Nacional de los Mercados y la Competencia, 2019).

Otra ventaja es que los costes anuales de explotación de las redes LPWAN que operan en bandas ISM son menores que los de los servicios de comunicación celulares que ofrecen las operadoras, pues solo Sigfox tiene un coste periódico.

En la actualidad se está llevando a cabo la implantación de distintas tecnologías LPWAN no celulares que operan en bandas ISM. Un ejemplo de ello es Sigfox, red que en Europa ya dispone de una huella considerable, alcanzando altas cotas de cobertura incluso en lugares recónditos del territorio (Figura 11).

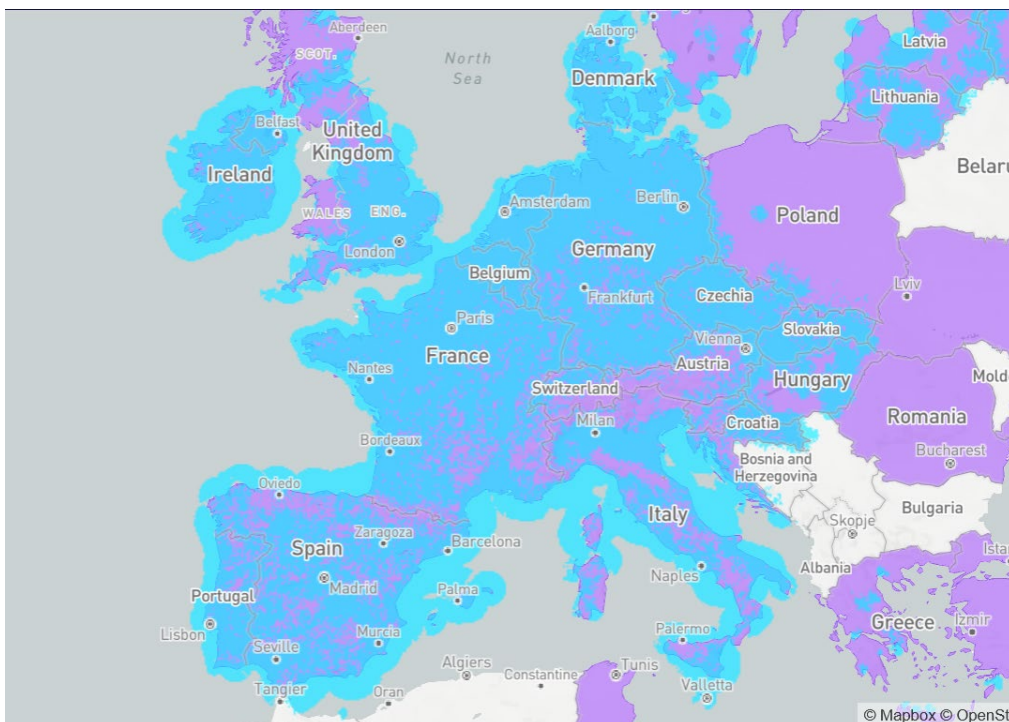


Figura 11. Mapa de cobertura de la red Sigfox en el continente europeo. En azul se visualizan las áreas en las que existe cobertura de esta red (Sigfox).

En España esta red fue desplegada por la empresa Cellnex en el año 2015, actualmente cubre un 75% del territorio y 93% de la población. Desde que la red Sigfox es una realidad se ha ido incrementando el número de inversiones, llegando a alcanzar la compañía Sigfox a acuerdos privados con distintas empresas (Securitas Direct, Amadeus, DHL), que están implantando este sistema y ayudarán a asentarla a una escala industrial. Fuera de la unión europea el despliegue de la red Sigfox se encuentra en un estadio muy primitivo, aunque existen planes para su implantación en una gran cantidad de países según puede verse en el mapa anterior. A fecha de 2018 esta tecnología contaba con una cuota de mercado global del 3% de las tecnologías LPWAN (Blackman, 2019).

Pese a tener ciertas limitaciones técnicas como son 140 mensajes de 12 Bytes de subida y únicamente 4 mensajes de 8 Bytes de bajada diarios, Sigfox se posiciona como una solución para el segmento de seguimiento de mercancías (*asset tracking*) gracias a su reducido coste por dispositivo. Varias empresas lo están utilizando para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro. Un ejemplo de aplicación de esta tecnología para *asset tracking* es el seguimiento de 250.000 carros de paquetería que realiza la empresa DHL en sus instalaciones logísticas (Blackman, 2019).

Otra tecnología LPWAN ISM es LoRaWAN. Este sistema ofrece la posibilidad de conectarse a una red existente, siempre que haya un *gateway* en la zona, o alternativamente se puede crear una red privada con la instalación de un *gateway* privado. Para el caso de uso en el que se desea dotar de conectividad a una serie de elementos aislados, múltiples dispositivos pueden conectarse a un *gateway* que esté emplazado en un lugar fijo y se encuentre conectado a internet por cualquier otro medio. Si se utiliza este sistema tendrían que tenerse en cuenta las limitaciones de uso de la banda ISM de 868 MHz en Europa. Estas limitaciones de uso están reguladas por la agencia ETSI y limitan el tiempo en el que se puede estar transmitiendo en esa frecuencia. Si no fuese así, los canales destinados a ISM podrían verse congestionados por realizarse muchas transmisiones simultáneas, debido al gran número de usuarios que operan en esta banda.

El despliegue de la red pública de LoRaWAN está siendo llevado a cabo de manera paralela por varios agentes dentro de la LoRa Alliance. Recientemente una *startup* española llamada Redexia ha anunciado que planea tener implantada la red cubriendo gran parte del territorio español en 2022. Por el momento la cobertura de esta red es muy pequeña en nuestro país y solo se ha implantado un pequeño número de *gateways* de propiedad privada para la red. Esta red es gratuita para un uso reducido a pequeña escala, para hacer mayor uso sí que hay que pagar costes periódicos.

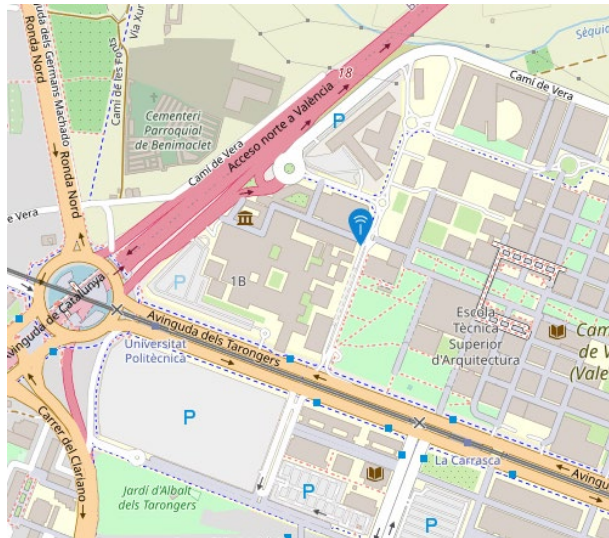


Figura 12. Gateway LoRaWAN conectado a The Things Network localizado en la UPV (The Things Network).

LoRaWAN cuenta globalmente con un gran ecosistema que crece cada año, y ocupa una cuota de mercado del 19% de las tecnologías LPWAN a fecha de 2018 (Blackman, 2019). Algunos operadores de telefonía como Orange y KPN respaldan esta tecnología, también importantes empresas del sector industrial como ABB, Cisco o Schneider Electric.

Sus ventajas son un mejor geoposicionamiento de los nodos, gran cantidad de oferta de dispositivos en el mercado, elevado nivel de seguridad, reducido consumo de batería y ser un estándar abierto. Estas virtudes hacen que la tecnología tenga un futuro muy prometedor en el medio plazo. Según la consultora IHS Markit, LoRa será la tecnología LPWAN más extendida en un futuro cercano.

LPWA – the technical knockout

	NON-CELLULAR		CELLULAR	
	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Bandwidth	125kHz	100Hz	200kHz	1.08MHz
Coverage	165dB	165dB	164dB	156dB
Cell capacity	40,000	1 million	200,000	1 million
Payload capacity	243 bytes	12 / 8 bytes (UL / DL)	1600 bytes	-
Battery life	15+ yrs	15+ yrs	10+ yrs	10+ yrs
Throughput	50kbps	600bps	200kbps	1mbps
Two-way comms	Yes	Yes	Yes	Yes
Security	AES 128 bit	AES 128 bit	3GPP (128-256 bit)	3GPP (128-256 bit)
Localisation	Yes (TDOA)	Yes (RSSI)	Yes (3GPP Rel 14)	Yes (3GPP Rel 14)

Source: ABI Research

Figura 13. Comparativa técnica de las distintas tecnologías LPWAN (ABI Research).

Por otro lado, pueden encontrarse las redes celulares tanto de segunda generación como LPWAN. En lo que respecta a las redes celulares de segunda generación, cabe la posibilidad de que las redes 2G GSM, GPRS y EDGE sean desmanteladas en un horizonte próximo (Digitalpolicylaw, 2021). Esto no está ocurriendo en Europa por el momento, pero es una situación que ya se está dando en otros países como Japón, donde se desmantelaron en 2011, o Corea del Sur. Por otra parte ha quedado patente que no se trata de sistemas seguros, se ha publicado gran cantidad de información sobre el algoritmo A5/1 y se ha filtrado que la NSA lo descrypta de manera rutinaria (The Washington Post, 2013). Se espera que, en Europa, estos sistemas sean actualizados a EC-GSM a medio plazo, aunque todavía no existen fechas definidas. Los sistemas EC-GSM tienen mayores niveles de seguridad, pues incorporan AES-128 y permiten un número de dispositivos conectados a cada célula mucho mayor, 50.000 dispositivos registrados por célula, mientras que GSM en la actualidad soporta en torno a 10.000 dispositivos registrados por célula cuando existe un flujo de datos reducido con ellos (How Many Smart Meters can be Deployed in a GSM cell?, 2013).

A la actualización al estándar EC-GSM habría que sumar la aparición de otras dos tecnologías celulares LPWAN: NB-IoT y LTE-M.

Existe una gran variedad de sistemas de comunicaciones que proporcionan conectividad al Internet de las Cosas (Figura 14). A fecha actual no existen evidencias concluyentes que indiquen que una tecnología va a imponerse sobre las otras, puesto que su uso dependerá de la aplicación específica y además estas tecnologías se posicionan para cubrir distintos nichos de mercado, como se ve en la Figura 14. También cabe la posibilidad de combinar el uso de varias tecnologías en un mismo dispositivo, como hacen algunos dispositivos existentes en el mercado. Un ejemplo de ello es la empresa Securitas Direct; sus alarmas utilizan infraestructura cableada, móvil, y ahora están implantando Sigfox como tecnología de respaldo por su mayor fiabilidad ante un intento de sabotaje; su tecnología UNB de espectro ultra estrecho resulta más robusto frente a los intentos de *jamming* o de interferencia.

Las tecnologías LPWAN que operan en bandas sin licencia (LoRaWAN y Sigfox) mantendrán la hegemonía en este sector respecto de las redes LPWAN celulares. Continuarán absorbiendo paulatinamente cuota de mercado de las tecnologías M2M propietarias hasta el año 2026, en el que se prevé que las redes LPWAN Celulares desbanquen a las primeras una vez se hayan solucionado los problemas de los que adolecen actualmente, como son la falta de dispositivos NB-IoT en el mercado (Blackman, 2019).

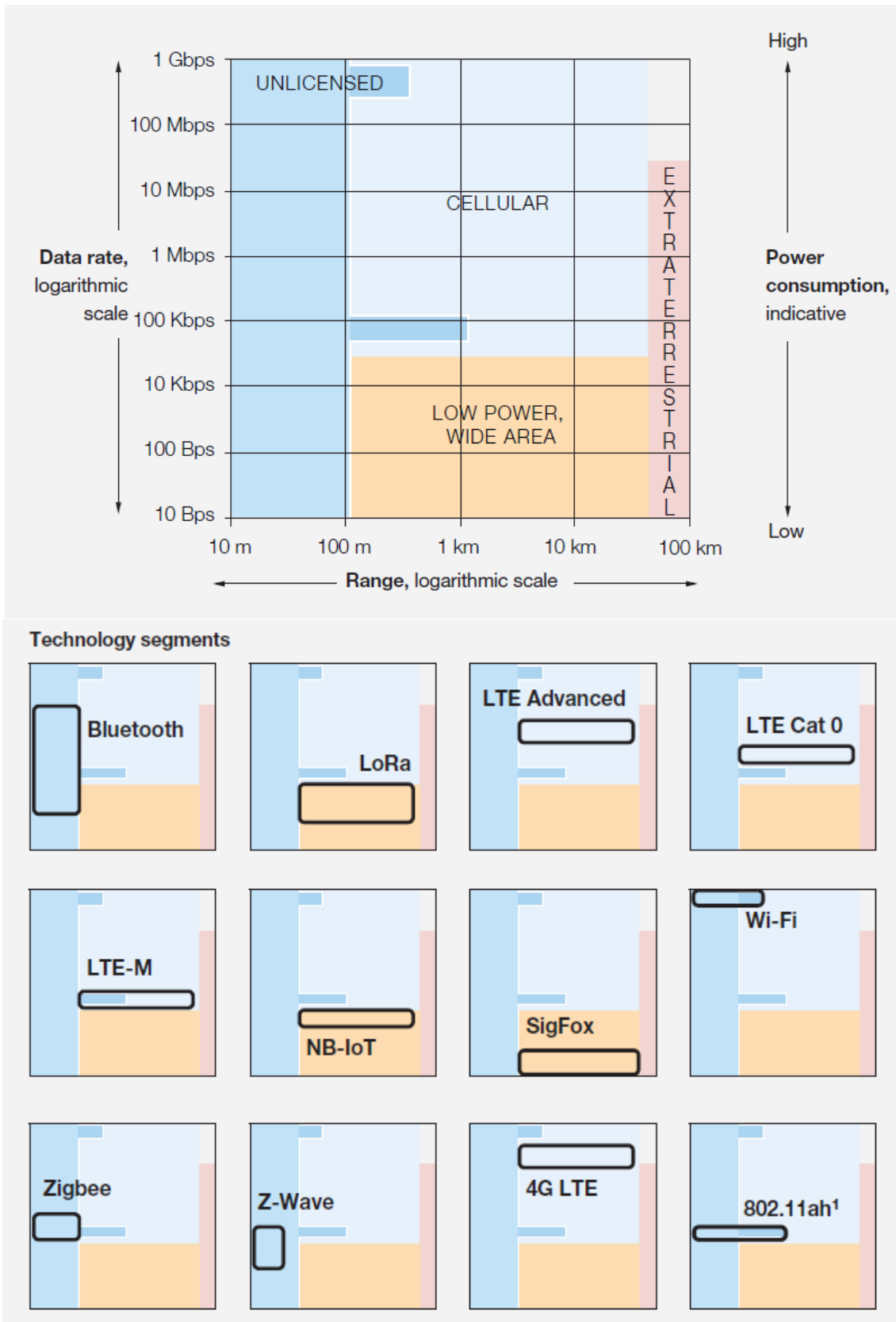


Figura 14. Clasificación en categorías de las distintas tecnologías de comunicaciones (McKinsey&Company, 2017).

Conclusión del análisis

Atendiendo a sus características técnicas, LoRaWAN sería una tecnología adecuada para uso en zonas urbanas y en sistemas estacionarios. Sistemas que siempre se encuentren dentro del rango de un *gateway* LoRaWAN y permanezcan en el mismo lugar durante largos periodos de tiempo. El uso de esta tecnología podría extenderse también a los dispositivos móviles si se supera el reto tecnológico de la interoperabilidad y compatibilidad de *hardware*. Con ello quedaría solucionado el problema de *roaming* y los dispositivos en movimiento podrían mantener la conexión.

Sigfox sería la tecnología con las menores capacidades, pero estas serían suficientes para su uso en un dispositivo localizador, de hecho, es el sector hacia el que se está orientando actualmente. La empresa se está centrando en reducir el coste por dispositivo para hacer su uso viable en el seguimiento de bienes de poco valor.

Por su parte, las redes celulares por su mejor cobertura y acuerdos de *roaming* serían aptas para *tracking* de mercancías y para uso en sistemas móviles. La aparición de las redes celulares LPWA mejoraría, en teoría, el área de cobertura de las redes celulares ya existentes, pues una estación base podría llegar a cubrir un radio de distancia mayor. Estas redes tienen un consumo de batería mayor que las redes LPWA ISM, pero con mayores tasas de transferencia de datos, por ello son más aptas cuando se requiere uso multimedia o gran tráfico de datos.

La red celular LPWA que aparentemente va a tener mayor relevancia a nivel mundial es NB-IoT, pero no debe dejarse de lado la tecnología EC-GSM, tecnología con la cual NB-IoT compartirá protagonismo en este continente. EC-GSM es una actualización de las antiguas redes 2G en proceso de estandarización que de implementarse tendrá gran importancia en Europa, lugar en el que la cobertura GSM es total.

Sin embargo, estas expectativas no deben hacer olvidar la situación actual. Actualmente se está promocionando que la tecnología 5G va a permitir conectividad en entornos rurales, a la vez que se plantea el apagado de las redes 2G y 3G. Todo esto a pesar de que, a excepción de la red 2G de Movistar, ninguna red ha llegado a cubrir la totalidad del territorio español en ningún momento de su vida útil. Por último, no hay que olvidar que hace una década también se promocionó la tecnología 4G y la huella de cobertura de estas redes aún es realmente baja. Esto se explica porque no resulta económicamente interesante desplegar las últimas tecnologías de comunicación en lugares remotos con poca densidad de población, y por ende con pocos clientes potenciales (Figura 5). Por estas razones, estas tecnologías de nueva implantación difícilmente alcanzarán altas cotas de cobertura en un futuro cercano y puede concluirse que, al menos en el medio plazo, las redes 5G no van a ser por sí mismas la solución para dotar de comunicación a lo que se conoce como “La España vaciada”.

Consecuentemente, el dispositivo diseñado no va a incorporar este último tipo de conectividad. Por otra parte, tampoco resultaría interesante dotar a un nuevo desarrollo con tecnologías de comunicaciones que se anticipan obsoletas en un futuro cercano, como son las redes 2G, cuando existen otras soluciones con un horizonte de vida mayor. Se selecciona por tanto la tecnología LoRa / LoRaWAN por las mayores capacidades respecto a Sigfox y menores costes de operación.

1.5.2 Sistemas de Geoposicionamiento

Ciertas aplicaciones mencionadas en el apartado 1.3, como el dispositivo de seguimiento para cabezas de ganado, requieren conocer la posición exacta del dispositivo en cualquier momento. Existen varias formas de conseguir esto, pero la más precisa es utilizar un sistema GNSS.

Por el momento existen cuatro sistemas de geolocalización: GPS (Estados Unidos, 1995), GLONASS (Rusia, 1995), BeiDOU (China, 2020) y Galileo (Europa, 2019). La mayoría de estos sistemas se concibieron con la idea de ser utilizados con fines militares, y luego se extendió su uso civil, siendo de ellos el Galileo el único destinado originalmente para ser utilizado con fines civiles.

La posibilidad de que los sistemas militares dejen de estar operativos para uso civil es real, por lo que resultaría interesante no depender exclusivamente de ellos. Hasta mayo del año 2000 el departamento de defensa mantuvo en funcionamiento en sus satélites una funcionalidad llamada "Disponibilidad Selectiva". Esta funcionalidad degradaba la calidad del servicio de posicionamiento y provocaba que los usuarios civiles del sistema GPS tuvieran errores de precisión de en torno a 50-100 metros (U.S. Department of Defense, 2007).

La mayoría de fabricantes de módulos GNSS incluyen la posibilidad de usar cualquiera de esos cuatro sistemas, pudiendo utilizarse simultáneamente varios de ellos de manera combinada (GPS+GLONASS), por ejemplo, para obtener mayor precisión.

1.5.3 Captación de energía

Para conseguir que el dispositivo sea autónomo este debe ser capaz de obtener su propia energía. Algunas formas de captación de energía a pequeña escala son: el efecto termoeléctrico, efecto electromagnético, o el efecto piezoeléctrico. En los sistemas basados en estos principios el movimiento o la vibración se transforma en una corriente eléctrica de baja intensidad. Esto es muy útil para los dispositivos conocidos como *wearables*; dispositivos portables que siempre se encuentran sometidos a movimiento constante y con bajos requisitos energéticos, pero la mayoría de estos métodos de obtención de energía requiere que el dispositivo esté en movimiento o sujeto a vibraciones, situación que no se dará cuando se encuentre estacionario.

Otra manera de obtener energía es aprovechar el fenómeno fotoeléctrico. Este fenómeno explica la conversión de la energía lumínica de los fotones de luz incidente en energía eléctrica aprovechable por los sistemas electrónicos.

Las células fotovoltaicas son un ejemplo de dispositivo que hace uso de este fenómeno. Aunque requieren luz para funcionar y deben estar expuestas al entorno, tienen la ventaja de ser una solución escalable, ya que la energía captada depende directamente de su área y no hay un tamaño mínimo para que su uso sea viable. Otras de sus ventajas son que no necesitan piezas móviles, por lo que son sistemas de gran fiabilidad, y que tienen una potencia específica considerable; es común encontrar módulos con una eficiencia de en torno al 20%.

Estas razones hacen que la solución más interesante para un dispositivo estacionario que se encuentre en el exterior sea utilizar células fotovoltaicas como sistema de captación de energía.

1.6 Análisis y evaluación de soluciones comerciales existentes

Existen en el mercado algunos productos con capacidades similares a las especificadas en el apartado 1.3 cuyo análisis resulta muy interesante. A pesar de que estos productos no son autónomos ni muy integrados sí que pueden servir de referencia. Otros, como el Wavecomm Q52 Omni, ya no se fabrican.

1.6.1 Wavecom Q52 Omni

El fabricante Wavecom, hoy en día Sierra Wireless, presentó este dispositivo en el año 2008. En aquel momento se presentaba como el primer dispositivo que integraba en la misma tarjeta comunicaciones celulares y satelitales. Esto le ofrecía una cobertura mundial por lo que era un dispositivo apto para seguimiento de mercancías que resulta interesante analizarlo.



Figura 15. Parte superior de la tarjeta Wavecom Q52 Omni (Elaboración propia).

Este dispositivo fue un hito si se tiene en cuenta que cuando apareció en el mercado todavía no se había acuñado el término Internet de las Cosas. Su precio era elevado y la conectividad con redes celulares y satélite tenía un coste de mantenimiento apreciable, por lo que estaba orientado para seguimiento de bienes de muy alto valor. Aunque no fue un éxito comercial, sentó las bases para algunos dispositivos del futuro; la idea de un dispositivo integrado que tuviese conectividad global y pudiera estar localizado en todo momento. Esta misma funcionalidad puede conseguirse en la actualidad a un precio mucho más bajo, ya que el coste de la tecnología se ha reducido mucho.

Sus principales características eran: Conectividad con redes celulares GSM y GPRS, conectividad con satélites de la red Orbcomm, procesador ARM9 y posibilidad de ampliación a través de un conector (Wavecom, 2008).

La conectividad celular de este dispositivo posibilitaba que se pudiera conectar a redes 2G. Tenía acceso a internet si se encontraba en el rango de una célula GSM haciendo uso de CSD o alternativamente por conmutación de paquetes si el dispositivo se encontraba dentro del rango de una red GPRS.

Adicionalmente, también disponía de conectividad a la red de satélites Orbcomm, que ofrece conectividad global para sistemas M2M. Esta conectividad le permitía conectividad a internet aun cuando el dispositivo no se encontraba en el rango de cobertura de la red móvil.

El microprocesador era un ARM926 de arquitectura ARM9 que funciona en el sistema operativo RTOS, lo que lo hacía totalmente programable para cualquier aplicación. Además, se podía comunicar por comandos OpenAT, que son un estándar industrial de comunicaciones para M2M.

Por último, destaca en este dispositivo la capacidad de expansión, con 18 GPIO disponibles para el usuario. Esto permite que en el futuro se puedan añadir periféricos a demanda de la aplicación. Wavecom ofreció en cierto momento un módulo 3G para poder actualizar la conectividad celular a este estándar.

Este dispositivo no integra funcionalidades de captación ni almacenamiento de energía, por lo que necesita depender de una fuente de alimentación externa que acondicione el suministro energético a sus requerimientos particulares. Este consumo energético podía ser alto, alcanzando 5 W en situaciones puntuales.

1.6.2 Nodo LoRa de Elektor

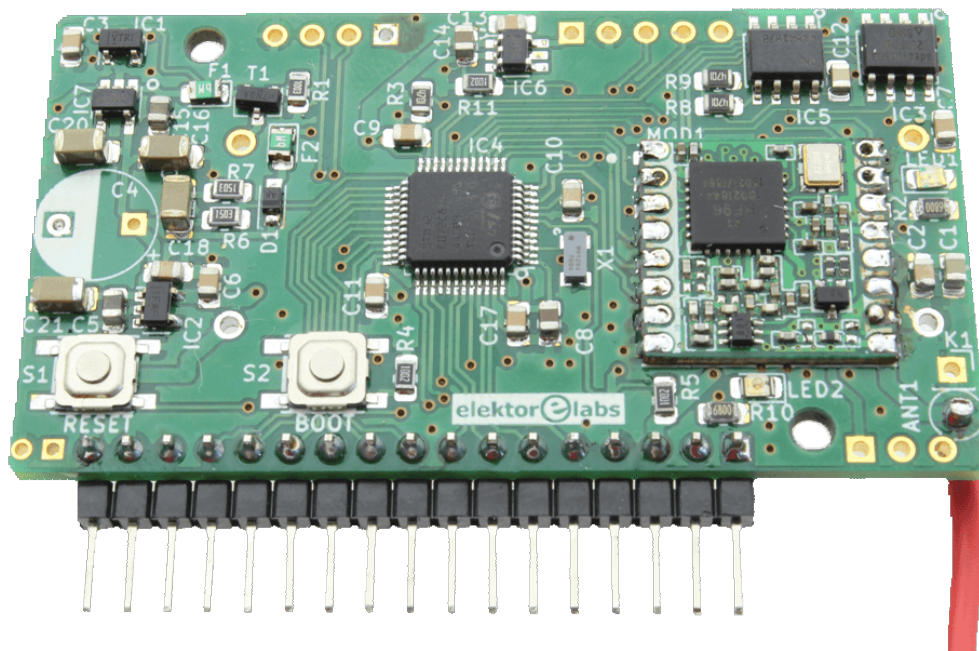


Figura 16. Nodo LoRa de elektor (Elektor, 2019).

El nodo LoRa de Elektor (*elektor LoRa Node*) Está basado en el microcontrolador STM32F072. Como sistema de comunicaciones utiliza un módulo LoRa RFM95W, que es compatible con el estándar LoRaWAN. También incorpora un módulo GPS para geolocalización y otro tipo de funcionalidades como F-RAM, coprocesador criptográfico o almacenamiento en memoria Flash.

De este dispositivo resultan interesantes muchos de los sistemas que integra. El microprocesador de la familia STM32 es un estándar industrial *de facto* en la actualidad y el módulo de comunicaciones es un módulo LoRa. Además, también incorpora el ya mencionado

módulo de geolocalización. Por el contrario, la capacidad de almacenamiento no es algo necesario para las aplicaciones especificadas en el apartado 1.4, pues estar continuamente conectado a la red minimiza la necesidad de almacenar datos en el propio dispositivo; los datos se transmiten en tiempo real y según se requiere.

Entre sus carencias destaca, al igual que ocurre con el Wavecom Q52, que no integra ninguna fuente de energía en la tarjeta, dependiendo de una fuente de alimentación externa para el suministro de energético. Sí que está previsto que pueda funcionar con baterías recargables, pero esta tarjeta no incorpora un circuito que las cargue utilizando la alimentación de la tarjeta como fuente de energía. En lo que respecta a la antena, no está prevista la incorporación de ningún conector y debe soldarse de manera manual.

En cuanto a su operación, los consumos son reducidos; microcontrolador y módulo LoRa son dispositivos de bajo consumo. El precio de la tarjeta montada es de 35€ y no tiene coste periódico si se utiliza la red gratuita TTN o se utilizan únicamente comunicaciones LoRa entre dispositivos.

De esta tarjeta resulta muy interesante que haya sido diseñada para que pueda ser fabricada de una manera modular. Si se realiza una lista de montaje (BOM) particular, incluyendo en esta únicamente los componentes necesarios para el funcionamiento de ciertos sistemas y dejando sin montar aquellos cuya utilización no esté prevista para una aplicación determinada.

1.6.3 P-NUCLEO-LRWAN1

No se trata de un dispositivo completamente integrado, sino de un kit de desarrollo con una tarjeta de expansión que proporciona conectividad LoRa.

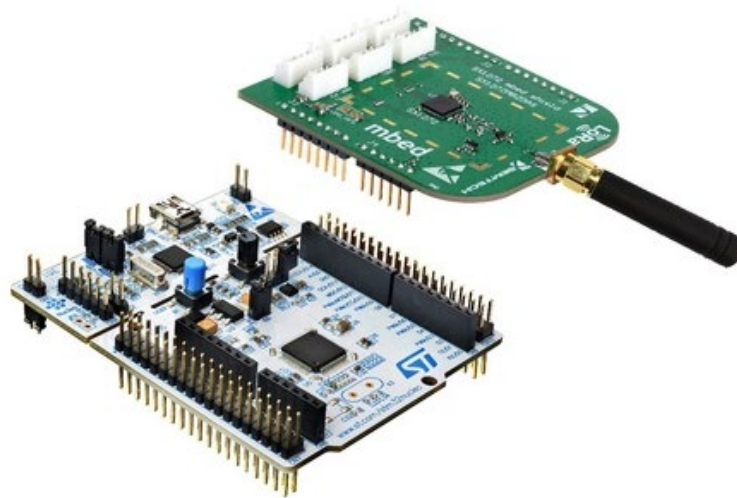


Figura 17. Conjunto de elementos que forman el P-NUCLEO-LRWAN1 (ST-Microelectronics).

La tarjeta de desarrollo, del fabricante ST-Microelectronics, es del modelo NUCLEO-L073RZ. Esta tarjeta integra un microcontrolador de la familia STM-32, al igual que el nodo LoRa de Elektor. Sin embargo, es un microcontrolador más optimizado para el bajo consumo, lo que lo hace más apto para un uso con baterías en comparación con el nodo LoRa de Elektor.

Puesto que se trata de un kit de desarrollo, las posibilidades de expansión son máximas. Además, a diferencia del nodo LoRa de Elektor, la tarjeta de expansión que incorpora las funciones de radiocomunicaciones dispone de conector para la antena. Esto resulta conveniente y deja abierta la posibilidad de conectar una antena externa a través de un cable coaxial.

Igual que ocurre con los dos dispositivos anteriormente analizados, el P-NUCLEO-LRWAN1 no incorpora ningún sistema para captar o almacenar energía. Necesita ser alimentado a través de un conector USB por lo que la adecuación del suministro energético para esta tarjeta se tiene que realizar de manera externa. No es, por tanto, una solución totalmente integrada y depende de otros sistemas para su funcionamiento

A pesar de no ser una solución integrada ni económicamente escalable hasta 5000 unidades, pues este kit tiene un coste de 60 € aproximadamente, si resulta interesante su uso para realización de pruebas y prototipado a escala de laboratorio.

1.7 Definición de las Especificaciones de DISEÑO del producto (EDP)

A continuación, se definen las especificaciones que debe cumplir el diseño del producto. A la hora de determinar estas especificaciones debe ponerse atención a las necesidades del producto (1.3) y no en determinar las características que debe cumplir, ya que esto podría alejar el diseño del producto de las necesidades originales (Departamento de Proyectos de Ingeniería UPV, 2015).

Especificaciones funcionales

- Posibilidad de ser alimentado con baterías, células solares o alimentador externo.
- Reducido consumo de energía, para tener una larga autonomía y poder permanecer desatendido durante largos periodos de tiempo, a pesar de que la batería pueda estar arruinada o agotada. Por ello se contempla el sobredimensionado de la capacidad de almacenamiento en la batería.
- El dispositivo debe ser capaz de cargar la batería utilizando como fuente de energía las células fotovoltaicas, pero también con la fuente de alimentación externa.
- Posibilidad de adaptarse a distintos escenarios de uso, dispositivo con expandibilidad.

Especificaciones no funcionales

- Espacio suficiente para poder ubicar células fotovoltaicas sobre la superficie del dispositivo.
- Resistencia al polvo y al agua. El dispositivo podrá estar expuesto a estos elementos si se encuentra en un entorno hostil. Podrá existir condensación si la humedad relativa supera valores del 90%.
- Resistencia a ciclos de carga provocados por ciclos térmicos día/noche, teniendo en cuenta que el dispositivo diseñado podrá estar sometido a condiciones de intemperie.
- Tiempo de vida mayor de 10 años.

1.8 Diseño conceptual del sistema

En el apartado 1.3 se han evaluado las necesidades funcionales que debe cumplir el dispositivo en función de los posibles escenarios de aplicación. Tras esto, en el punto 1.5 se han evaluado las distintas tecnologías existentes que permitirían dotar al dispositivo de dichas funcionalidades.

Esta información, junto con las especificaciones del apartado anterior (1.7), sirve para entrar en detalle en el diseño del dispositivo. Si se cruzan las necesidades con las restricciones es posible definir soluciones concretas al problema planteado.

Se propone el desarrollo de un dispositivo que incorpore conectividad LoRa y pueda captar energía con células solares. A este dispositivo se le da el nombre de **Nodo LoRa PV**.

Este dispositivo es un sistema que a su vez está formado por otros sistemas situados en un nivel jerárquico inferior (subsistemas). Partiendo de esto, se realiza un diagrama funcional que muestre conceptualmente la relación jerárquica entre los distintos bloques o sistemas que en conjunto formarán el producto final. Posteriormente, en la fase de diseño del esquema eléctrico y del circuito impreso, estos bloques funcionales se implementarán e integrarán seleccionando componentes y respetando las restricciones mecánicas.

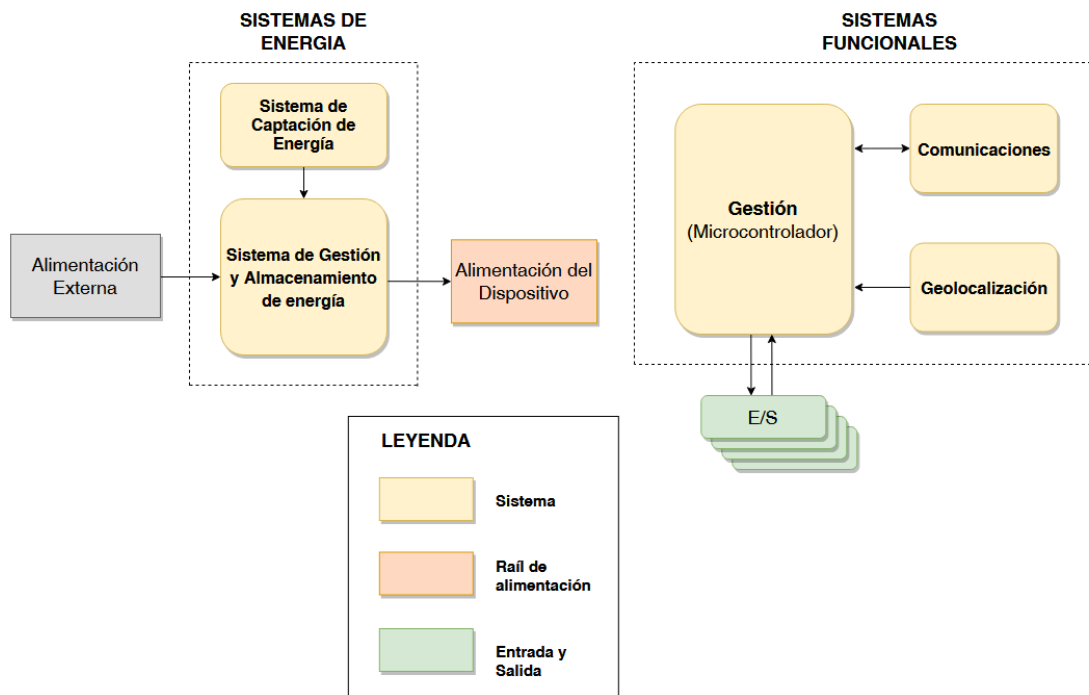


Figura 18. Esquema conceptual del dispositivo planteado en el que se muestran los distintos subsistemas de los que está compuesto (Elaboración propia).

El dispositivo Nodo LoRa puede descomponerse en dos tipos de sistemas: los sistemas funcionales y los sistemas de energía

Sistemas Funcionales:

- Microcontrolador
- Radiocomunicaciones
- Geoposicionamiento

Microcontrolador: Realiza las labores de procesamiento de datos y ayuda a gestionar y coordinar el resto de dispositivos en función de unas rutinas pre programadas. Es un elemento bastante complejo, un circuito integrado de gran complejidad que actúa como sistema de gestión del dispositivo

Sistema de Radiocomunicaciones: Permite al dispositivo comunicarse por radio para recibir y transmitir información con dispositivos similares o con una estación base (servidor o *gateway*)

Sistema de geolocalización, o geoposicionamiento: Permite al dispositivo conocer en todo momento su posición. Para eso se vale de la comunicación con una constelación de satélites.

En otra categoría pueden clasificarse los sistemas de energía. Estos subsistemas no aportan ninguna funcionalidad avanzada, pero son requeridos para el funcionamiento del dispositivo. Son los que permiten que el resto de sistemas tengan un suministro eléctrico adecuado.

Sistemas de Energía:

- Captación de energía
- Gestión y almacenamiento de energía

Sistema de captación de energía: El dispositivo es un sistema que a su vez está formado por otros sistemas que se encuentran en un nivel jerárquico inferior (subsistemas). Las condiciones del suministro eléctrico que entrega este sistema son irregulares por la naturaleza de las células fotovoltaicas y necesitan ser adecuadas para su utilización.

Sistema de gestión y almacenamiento de energía: Este sistema adecúa el suministro eléctrico de las fuentes de energía disponibles para que los sistemas funcionales del dispositivo puedan funcionar correctamente. Además, se ocupa de almacenar los excedentes de energía en la batería. Sus fuentes de energía eléctrica son: el sistema de captación, la batería y la alimentación externa.

2. DISEÑO DEL PRODUCTO

En este capítulo se aborda el diseño del producto Nodo LoRa PV partiendo del diseño conceptual del sistema realizado en el apartado 1.8 . En los anejos puede encontrarse toda la documentación generada durante el diseño; esquema eléctrico, planos de la tarjeta y lista de materiales.

2.1 Selección de componentes y diseño eléctrico

En un primer lugar se deben seleccionar los elementos clave que formarán los bloques funcionales mencionados anteriormente y condicionarán el rumbo del proyecto.

Posteriormente se harán selecciones puntuales de componentes de menor importancia atendiendo únicamente a criterios técnicos y económicos, pero que no afectarán en gran medida al desarrollo del producto. Además, en la fecha en la que se realiza este proyecto existen graves problemas en la cadena de suministro de semiconductores y componentes electrónicos. Esto debe tenerse en cuenta para el diseño del dispositivo, ya que puede que a la hora de la fabricación se seleccionen componentes alternativos con la misma funcionalidad.

En un primer lugar se seleccionan los componentes que aportan las funcionalidades principales al producto. Estos elementos son los núcleos de los subsistemas de gestión del dispositivo, comunicaciones y geoposicionamiento que pueden verse en el diagrama funcional de la Figura 18; microcontrolador, módulo de radiocomunicaciones LoRa y módulo de geolocalización respectivamente. Estos componentes son únicos y la búsqueda de alternativas es muy complicada.

En segundo lugar se seleccionan los componentes que forman el sistema de suministro de energía del dispositivo. Este sistema está formado por el subsistema de captación de energía y el subsistema de gestión y almacenamiento de energía. Los componentes a seleccionar serán: células fotovoltaicas, circuito integrado de gestión de la energía, fuente de alimentación externa, batería, circuito integrado de monitorización de la batería.

La selección de los componentes se hará siguiendo el siguiente esquema:

Sistema de captación y almacenamiento de energía

- Células Fotovoltaicas

Sistema de Gestión y Almacenamiento de Energía

- Circuito integrado de gestión de la energía
 - Integración en el dispositivo diseñado
 - Selección del inductor
- Alimentación externa
 - Conectores de alimentación
- Batería
- Circuito Integrado de monitorización de la batería

En último lugar se determinan las características que deben cumplir los componentes pasivos (condensadores, resistencias e inductores), para los que se especificará un número de pieza concreto a modo de referencia. Este número de pieza servirá para determinar las especificaciones mecánicas y eléctricas (encapsulado y comportamiento físico) que debe cumplir el componente. La elección se realiza dependiendo de la disponibilidad instantánea por parte de los proveedores, escogiendo modelos alternativos si es necesario.

2.1.1 Microcontrolador

El microcontrolador es el elemento principal del sistema de gestión del dispositivo. El *firmware* programado en este sistema embebido permite hacer uso del resto del hardware.

Este componente se selecciona teniendo en cuenta cinco factores. Familia, consumo de energía, disponibilidad en el mercado, funcionalidad y precio. Puesto que se desea que el producto diseñado sea abierto y tenga capacidad de expansión resultaría necesario disponer de un gran número de entradas y salidas (I/O) para que puedan ser utilizadas en el futuro para conectar sensores, relés o módulos externos en una aplicación que lo requiera.

Por otra parte, también resulta interesante ver con que periféricos integrados cuenta cada microcontrolador analizado. Por ejemplo, tal vez disponer de bus CAN pueda resultar interesante para ciertas aplicaciones industriales, conversor Analógico-Digital para medir ciertas magnitudes físicas en un entorno remoto o incluso un sensor de temperatura integrado en el propio chip.

Para los escenarios de uso planteados en el apartado 1.3 no se requiere que el microcontrolador disponga de una capacidad de procesamiento muy elevada, pero en cambio sí que se desea reducir el consumo energético al máximo posible. El consumo de energía es totalmente dependiente y directamente proporcional a la velocidad de reloj por lo que esta no deberá ser muy rápida; 8 o 16 MHz suelen ser valores habituales de velocidad de reloj para microcontroladores.

Existen múltiples arquitecturas de microcontroladores. Tras una preselección se valoran las siguientes:

- PIC

Este tipo de microcontroladores fue muy popular a primeros de los años 2000. Esta familia fue una de las primeras que pudo programarse en lenguaje C. Esto hizo que se popularizasen como plataforma de aprendizaje, siendo utilizados en muchas universidades como plataforma de introducción a la programación de sistemas embebidos. Además de estar extendidos en el campo de la enseñanza y en la comunidad *maker*, estos microcontroladores también han tenido una gran aceptación en el mercado industrial.

El fabricante Microchip tiene un gran abanico disponible de microcontroladores, la mayoría de los cuales son de 8 bits, aunque también tiene productos de 16 y 32 bit.

- **ATMEGA**

Se trata de microcontroladores de 8 bit y arquitectura AVR que han sido también ampliamente utilizados. Su uso en la plataforma Arduino los ha popularizado mucho. Una de las ventajas, a parte de su bajo coste, es que funcionan a 5 V, algo cada vez menos habitual.

Uno de los microcontroladores que más encajaría para el uso requerido es el ATMEGA2560. Las I/O de las que dispone este microcontrolador son compatibles TTL (corriente) o CMOS (tensión).

- **ATSAM**

Esta es otra de las familias de las que dispone el fabricante Atmel, pero para esta familia no se utiliza arquitectura AVR sino ARM. Distintos modelos tienen licenciados distintos núcleos ARM Cortex M. Todos los microcontroladores son de 32 bits.

Uno de los microcontroladores de la familia que cumpliría con los requisitos es el AT91SAM3X8E. Este microcontrolador tiene un encapsulado con un gran número de pines, con gran tamaño de memoria Flash y memoria SRAM para almacenamiento del programa. Este microcontrolador es utilizado en la plataforma Arduino Due, por lo que es muy conocido.

Otro microcontrolador de esta familia que resulta interesante comparar es el ATSAMC20N17A-ANT; un modelo más reciente y cuyo núcleo es el ARM Cortex M0+. Es más económico y menos potente en cuanto a capacidad de cómputo se refiere que el modelo anterior, pero también tiene un menor consumo energético.

Al igual que la gama de microcontroladores ATMEGA, se pueden programar tanto en el entorno de desarrollo Atmel Studio o en el entorno de desarrollo Arduino

- **STM32**

Se trata de una gran familia de microcontroladores ARM de 32 bit. Esta familia se introdujo en el año 2007 siendo su primer miembro el STM32F103. Desde entonces este tipo de microcontrolador ha sido ampliamente utilizado en multitud de aplicaciones. Dentro de la familia de STM32 existen a su vez diversas subfamilias. Una de las más recientes y con menor consumo de energía es la STM32L4. Posteriormente se han ido agregando otras subfamilias orientadas a distintos sectores, siendo las últimas de ellas la STM32L5 y STM32F7.

Una de las ventajas que presenta esta familia es que cuenta con un gran ecosistema. ST Microelectronics proporciona de manera gratuita el entorno de desarrollo STM32CubeIDE para esta familia de microcontroladores, aunque existen otros entornos de desarrollo compatibles. Además, ST proporciona y soporta de manera oficial el *core* STM32DUINO, que es una extensión que permite utilizar estos microcontroladores con el entorno de desarrollo de Arduino. Esto permite hacer uso de todo lo creado para ese ecosistema sin requerir cambios sustanciales en el código. STM32DUINO se encuentra en constante desarrollo con la colaboración y sugerencias de toda la comunidad.

Selección del microcontrolador

Las características de los microcontroladores mencionados anteriormente pueden verse en la siguiente tabla.

Tabla 1. Comparativa de características de los microcontroladores analizados

Modelo	Encapsulado	I/Os	Flash (kB)	SRAM (kB)	Otras funcionalidades	Precio (€)
ATMEGA2560-16AU	TQFP-100	86	256	8	10-bit ADC (16 Ch)	10.3
AT91SAM3X8EA-AU	LQFP-144	103	512	64	12 bit ADC (16 Ch) 12 bit DAC (2 Ch) CAN Ethernet	8.99
ATSAMC20N17A-ANT	TQFP-100	84	128	16	12-bit ADC (12 ch)	2.8
STM32L431RC	LQFP-64	52	256	64	12 bit ADC (16 Ch) 12 bit DAC (2 Ch) CAN	3.68

El precio de cada microcontrolador se ha obtenido de la web, para pedidos superiores a 1000 unidades y realizando la mediana de precio entre distintos proveedores autorizados. En cualquier caso, estos precios son orientativos y fluctúan en función de la paridad EUR/USD y disponibilidad de stock.

De ellos puede descartarse el ATMEGA2560, ya que es el que tiene un coste más elevado, a pesar de que dispone de un menor número de funcionalidades.

Todos los microcontroladores mencionados disponen de interfaces I2C y SPI y tienen similares funcionalidades, destacando el AT91SAM3X8E.

En cuanto consumo energético de cada uno de ellos, no es algo fácil de cuantificar, ya que depende de muchos factores. Por una parte, depende de la modernidad del proceso de fabricación; procesos más modernos tienen un tamaño de proceso menor. El tamaño del proceso hace referencia al mínimo tamaño de la puerta de un transistor MOSFET en el circuito integrado. Un menor tamaño de proceso de fabricación significa un menor consumo de energía a igualdad de número de transistores. Por ello parece razonable pensar que los microcontroladores que han sido diseñados más recientemente tienen un consumo de energía menor.

Los microcontroladores ATSAM3 fueron comercializados por primera vez en 2009 (EBVElektronik, 2010). En cambio, la familia de microcontroladores STM32 L4 fue introducida posteriormente y se fabrica con un proceso de 90 nm, por lo que cabe esperar que utilice un proceso de fabricación más reciente.

También es cierto que los microcontroladores con mayor potencia de cálculo y mayor número de transistores consumen más energía. De ellos, ATSAMC20N17A-ANT incorpora un núcleo Cortex M0+, AT91SAM3X8E incorpora un Cortex M3, mientras que STM32L431RC incorpora un Cortex M4 y por tanto es el más potente de los tres. Sin embargo, tratándose de un

microcontrolador que se publicita explícitamente para aplicaciones de bajo consumo, sumado a su mayor modernidad tecnológica, es el que menos consume.

Además, a diferencia de los otros microcontroladores, el STM32L431RC dispone de FPU. La FPU, o unidad de coma flotante, mejora la eficiencia de cómputo a la hora de ejecutar operaciones matemáticas con coma flotante ya que estas se realizan por *hardware* y no por *software*. Esto último suele ser un orden de magnitud más lento y genera un mayor consumo de energía.

Por estas razones el microcontrolador de la familia STM32 es el seleccionado para el dispositivo.

Particularidades de diseño eléctrico

La funcionalidad de la mayoría de los pines de este circuito integrado es configurable, modificando ciertos valores de los registros del microcontrolador se pueden seleccionar funciones alternativas para cada pin (AF). Además, todos los pines pueden ser configurados para disponer de interrupciones por hardware mediante el uso de una matriz configurable (STMicroelectronics, 2018). Esta característica simplifica mucho el diseño del circuito impreso, ya que en la etapa de trazado de las pistas podrán evitarse entrecruzamientos innecesarios de estas.

Habitualmente, el diseño de una tarjeta de circuito impreso se hace partiendo del diseño esquemático. En esta primera etapa se definen, a nivel jerárquico, las conexiones entre los componentes del circuito y se obtiene como resultado el esquema eléctrico. Tras esto se pasa a la siguiente etapa, el diseño del circuito impreso o PCB, en la que primero se estudia la mejor ubicación de los componentes en el espacio disponible de la tarjeta y en último lugar se realiza el trazado de las pistas.

En este caso se realiza de manera distinta, para el diseño de las conexiones eléctricas del microcontrolador al resto de subsistemas (diseño esquemático) se estudia en primer lugar el posicionamiento definitivo de los componentes. Una vez conocida la posición aproximada que ocupan en la tarjeta (Figura 48) se realiza la conexión entre microcontrolador y resto de sistemas utilizando para ello los pines del microcontrolador más próximos a ellos, ya que son configurables. De esta manera se simplifica el trazado de las pistas. A la hora de programar el microcontrolador se modifican las funciones alternativas (AF) de los pines del microcontrolador teniendo en cuenta el esquema de la tarjeta.

Para optimizar el conexionado del microcontrolador se ha seguido el siguiente orden:

- 1º Se han definido las conexiones fijas del microcontrolador (JTAG), pues se trata de pines con funciones predefinidas con poco margen de cambio.
- 2º Se ha seleccionado uno de los buses I2C mejor orientado hacia el periférico a conectar y se han definido las conexiones que los interconectan. Se ha seguido el mismo procedimiento con el puerto UART.
- 3º Se han definido el resto de conexiones de E/S no específicas en función de su posición.
- 4º Se han conectado las conexiones E/S del microcontrolador a conectores de expansión que permitan ampliar las funcionalidades en el futuro.

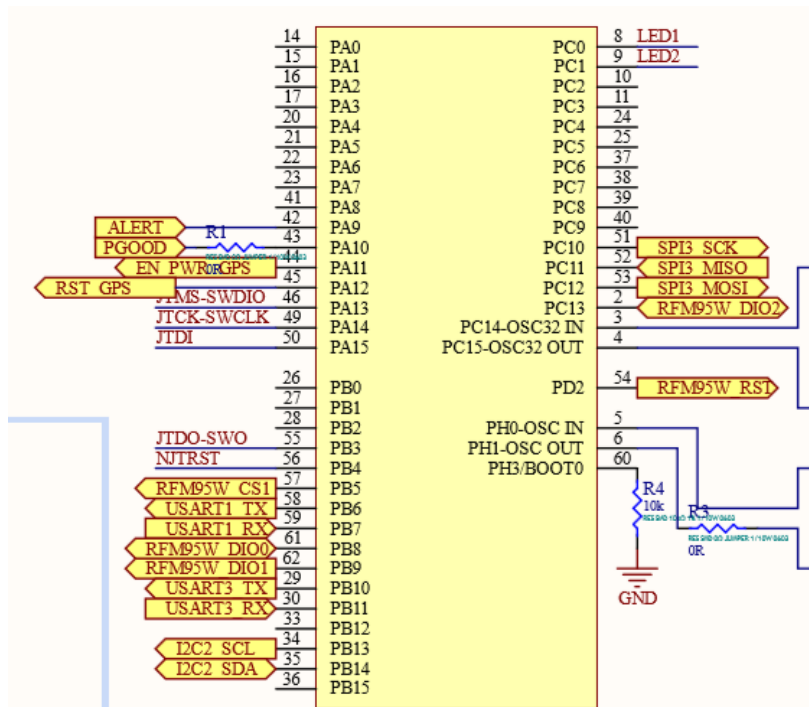


Figura 19. Detalle de definición de las conexiones en el microcontrolador (Elaboración propia).

- LED indicadores

La utilización de los diodos LED como indicadores ayuda a conocer el estado del hardware y pueden servir de ayuda a la hora de diagnosticar los problemas de funcionamiento de un dispositivo, siempre que esto se haya previsto previamente. Esto es de suma importancia en las etapas iniciales del desarrollo, en las que se trabaja con prototipos, pero también podrá serlo en el futuro.

En el diseño se utilizan varios diodos LED, el microcontrolador dispone de uno de color verde y otro de color rojo para poder indicar estados de funcionamiento. Puesto que la función de estos LED es indicar y no iluminar, se considera que cumplen su función si puede identificarse el cambio de estado encendido/apagado para una iluminación ambiente habitual. Además deberían lucir con la misma intensidad lumínica, cosa que se ha tenido en cuenta para el cálculo de las resistencias limitadoras.

En línea con la estrategia para minimizar el consumo al máximo se encuentra la idea de minimizar la corriente de funcionamiento de los LED. Se han realizado pruebas en el laboratorio y se ha comprobado que este tipo de LED se ilumina con muy poca intensidad de corriente.

La tensión del diodo verde, con tecnología InGaN, para la intensidad nominal de 30mA es de 3,35V. Comparativamente la tensión del LED rojo de tecnología AlInGaP a la misma corriente nominal es de 2V. Sin embargo, estos dos LED no lucen de la misma manera cuando circula por ellos la intensidad nominal. La intensidad lumínica del LED verde es de 520 mcd mientras que el LED rojo luce 350 mcd para estas condiciones. El cálculo de las resistencias no presenta ninguna dificultad más allá de tener en cuenta estas consideraciones.

- Programación del microcontrolador

Cuando se monten los microcontroladores en el circuito impreso no estarán programados. La programación del microcontrolador se hará una vez la tarjeta esté completamente montada. Para dicho fin se incluye un conector que permita conectar el ST-LINK; un dispositivo que permite programar y depurar el comportamiento del microcontrolador utilizando el interfaz JTAG IEEE 1149.1 cuando el microcontrolador está funcionando en la tarjeta.

La tarjeta de desarrollo utilizada para el desarrollo del prototipo incluye un programador ST-LINK que puede ser aprovechado para programar otros microcontroladores STM32 que se encuentren fuera de la tarjeta de desarrollo. El diseño realizado incluye un conector que permite utilizar la tarjeta de desarrollo para la programación del microcontrolador.

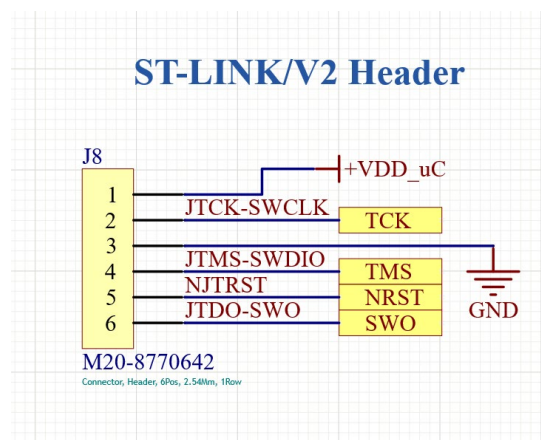


Figura 20. Esquema eléctrico del conector JTAG incluido en la tarjeta desarrollada (Elaboración propia).

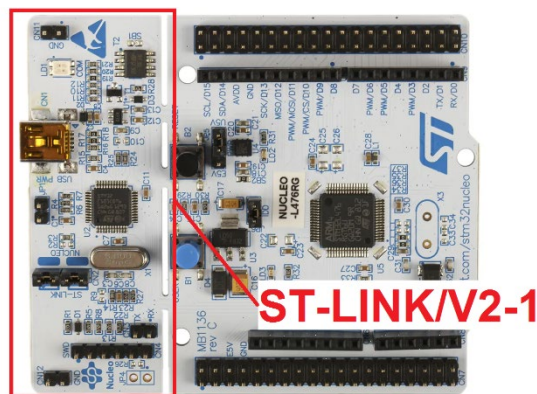


Figura 21. ST-LINK V2-1 de la tarjeta Nucleo 476 (Elaboración propia).

2.1.2 Sistema de comunicaciones

Partiendo de que el sistema de comunicaciones seleccionado ha sido LoRa, en la Tabla 2 se presentan algunos de los módulos comerciales analizados con sus detalles técnicos más relevantes.

Tabla 2. Características técnicas principales de los módulos de radiocomunicaciones LoRa analizados.

Modelo	Fabricante	Potencia transmisión (dBm)	Interfaz	Precio (€)
RN2483A-I/RM104	Microchip	14	UART	12
RFM95W-868S2	RF Solutions	20	SPI	13.27
CMWX1ZZABZ-093	muRata	18.5	I2C, SPI, UART, USB	11.12

Todos ellos son bastante similares; soportan el estándar LoRaWAN, utilizan la banda de 868MHz designada para ISM en Europa y se encuentran en un rango de precios muy cercano.

Una de las pocas diferencias entre ellos radica en estándar de comunicaciones con el microcontrolador soportado, aunque esto resulta poco importante, ya que el microcontrolador dispone tanto de I2C como de SPI y UART. La otra diferencia se encuentra en la potencia de transmisión, siendo el RFM95W el más potente y por tanto el que mayor distancia puede abarcar con su transmisión.

A pesar de las distintas características de las que dispone cada módulo, únicamente se encuentra disponible en el mercado el RFM95W-868S2 (Figura 22), que será por tanto el seleccionado.

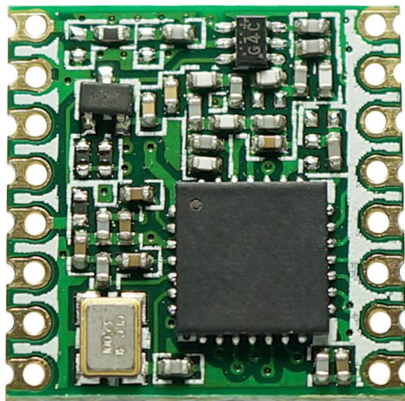


Figura 22. Módulo LoRa RFM95W-868S2 (HopeRF, 2013).

Este módulo LoRa se comunica con el microcontrolador utilizando el bus SPI. Está basado en el chip SX1276 de Semtech. Se alimenta a 3.3V, misma tensión que el microcontrolador.

Las líneas del SPI del módulo (SCK, MISO, MOSI y RESET) se conectan a uno de los tres buses SPI de los que dispone el microcontrolador. Si se utiliza la modulación LoRa es necesario conectar DIO0 DIO1 y DIO2 del módulo a pines del microcontrolador que soporten interrupciones por hardware. No será necesaria la conexión del resto de señales del módulo, ya que no se hará uso de ellas.

En la Tabla 3 pueden verse con detalle las conexiones efectuadas.

Tabla 3. Detalle de las conexiones del módulo RFM95W con el microcontrolador.

#Pin μ C	#Pin RFM95	Función
SCK (SPI 3)	SCK	Clock - Reloj
MOSI (SPI 3)	MOSI	Master Output Slave Input
MISO (SPI 3)	MISO	Master Input Slave Output
57	SS	Slave Select – Selección del dispositivo
54	RESET	Reinicio del módulo
61	DIO0	Digital I/O #1 – Entrada/Salida digital
62	DIO1	Digital I/O #2 – Entrada/Salida digital
2	DIO2	Digital I/O #3 – Entrada/Salida digital

Finalmente, las conexiones en el esquema eléctrico quedan como puede verse en la siguiente imagen:

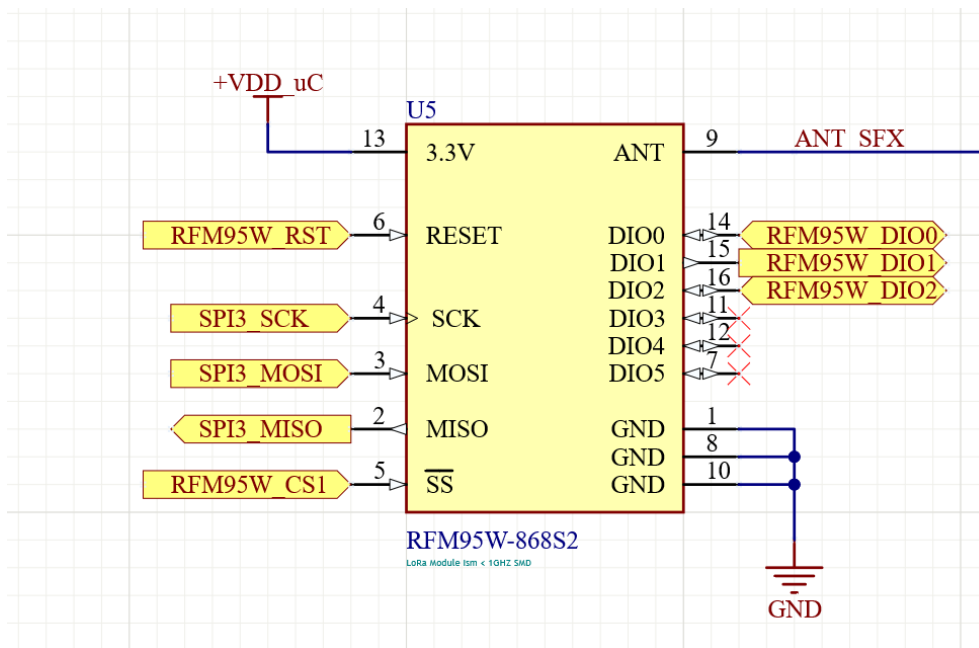


Figura 23. Detalle de conexión del módulo RFM95W (Elaboración propia).

La impedancia de salida de este módulo es de 50 Ω . Esto debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el circuito impreso, ya que la línea de transmisión debe tener la misma impedancia característica. Además, la línea de transmisión debe ser de la menor longitud posible para evitar pérdidas de la señal.

En el dispositivo se permitirá tanto el uso de una antena externa, usando un conector, como el uso de una interna que se encuentre montada en el propio circuito impreso. Este detalle se trata en un apartado posterior.

2.1.3 Sistema de Geoposicionamiento

Se consideran varios modelos del fabricante Quectel, uno de los que dispone de un catálogo más amplio, y un modelo del fabricante Sierra Wireless.

Tabla 4. Características técnicas principales de los módulos de geolocalización analizados.

Modelo	Fabricante	Multi-GNSS	Consumo (mA)	Interfaz	Precio (€)
L70	Quectel	NO	13	I2C, UART	3.58
L76L	Quectel	SI	19	I2C, UART	4.43
L96	Quectel	SI	20	I2C, UART	5.78
XM1210	Sierra Wireless	SI	35	UART, USB	5.77

Se selecciona el módulo Quectel L76L, concretamente el L76L-M33. Aunque no tiene un consumo tan reducido como el L70, este tiene posibilidad de utilizar varios sistemas de Geoposicionamiento, mientras que el L70 solo puede hacer uso de GPS. La posibilidad de utilizar distintos sistemas de Geoposicionamiento es algo interesante, tal y como se hace referencia en el apartado

Por su parte, el módulo L96 lleva una antena integrada. Esto puede ser una ventaja en algunos casos en los que se requiere economizar el espacio, pero esto no es algo necesario en el dispositivo diseñado.

Detalles de diseño

El módulo Quectel L76 está basado en el chip MT3333 de Mediatek, que tiene capacidad para conectarse a múltiples sistemas GNSS.

Este módulo se alimenta con una tensión de 3.3 V, el fabricante recomienda añadir dos condensadores en paralelo como solución de desacoplo. Para ello se dispone un condensador de 100 nF junto con otro de 10 μ F, que sirve como reservorio de energía cuando se encuentre funcionando a pleno consumo.

La comunicación con el microcontrolador se realiza a través de UART o I2C. En el dispositivo se conectará utilizando UART a una tasa de 9600 bps y usando comandos AT (Quectel, 2020). Puede hacerse uso del módulo directamente si se usan comandos AT para comunicarse por él, pero existen librerías como TinyGPS o GPS que simplifican en gran medida la tarea.

Los pines de comunicación serie UART se conectan a la UART1 del microcontrolador, pues es la UART más cercana al módulo. El fabricante recomienda en el diseño de referencia hacer esto a través de resistencias de 100 Ω (Figura 25), que servirán como punto de acceso para poder

depurar la línea UART y como protección ESD (Quectel, 2018). Para facilitar la tarea de depurado se añaden dos puntos de test.

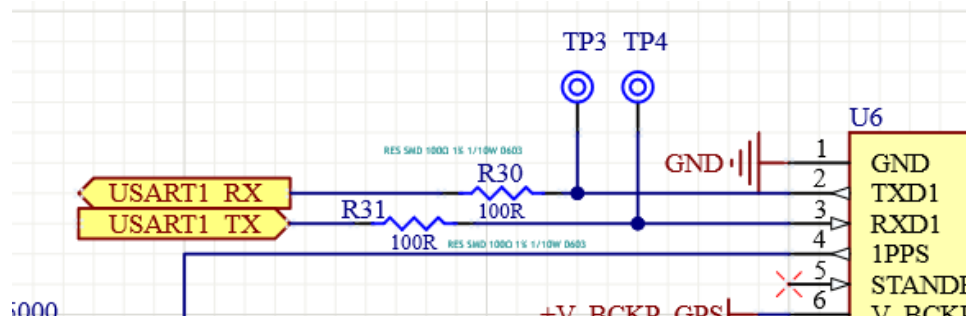


Figura 24. Detalle de las líneas de UART del módulo de Geoposicionamiento (Elaboración propia).

El consumo máximo de energía se da cuando el módulo se enciende, su corriente en esa situación del orden de aproximadamente 40 mA, que se reduce a en torno a 20 mA cuando se encuentra en seguimiento.

Con el objetivo de minimizar el consumo se dispone un interruptor digital que desconecte el módulo para mantenerlo de esta manera en *backup mode*, lo que reduce su consumo hasta 7 μ A. Por el contrario, si se eligiera mantenerlo en modo *Stand-By* mediante el uso del comando AT PMTK o mediante el pin de *Stand-by* el consumo sería de 0,5 mA. Por ello se opta por desconectar la alimentación principal haciendo uso del integrado TPS22917, un *load switch* que actúa como interruptor del módulo de geoposicionamiento y está gobernado por el microcontrolador.

La tensión en V_BCKP se puede mantener mediante el uso de un supercondensador que se cargue a través de una resistencia de 1 k Ω y un diodo Schottky. Este diodo se utiliza para que el supercondensador o batería utilizados para mantener alimentado el módulo no se descargue a través del circuito cuando este no se encuentra alimentado (Figura 25). La ventaja de utilizar un diodo Schottky en lugar de un diodo rectificador normal radica en su baja caída de tensión en circulación directa de la corriente (0.3 V) en comparación con el diodo rectificador estándar (0.7V). Si el nodo LoRa se utiliza con una batería principal no será necesario el uso de otro reservorio de energía para mantener la tensión en V_BCKP_GPS.

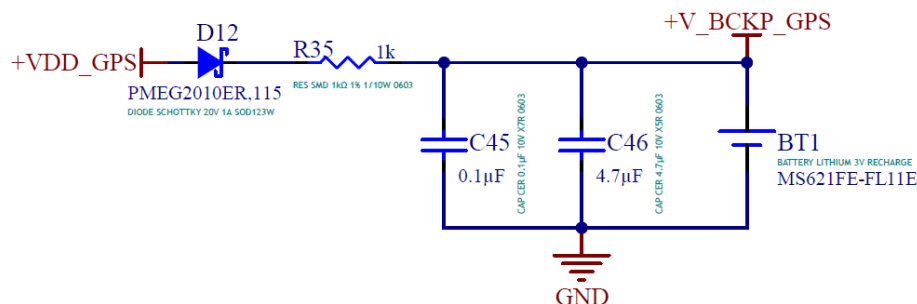


Figura 25. Fragmento del esquema eléctrico en el que se muestra el circuito de carga (Elaboración propia).

El fabricante recomienda en el diseño de referencia el uso de un diodo Schottky RB520S30T1G, pero no se encuentra disponible en ningún proveedor. Este diodo puede sustituirse por

cualquier diodo del mismo tipo con una tensión inversa superior a 10V, por lo que se utiliza el mismo que se usa en otras partes de la tarjeta.

2.1.4 Sistema de Captación de Energía

Células fotovoltaicas

La tipología de las células fotovoltaicas utilizadas viene dada por el desarrollo en un proyecto de investigación en curso cuya propiedad intelectual corresponde a la UPV, de modo que no se entra más en detalle.

Como novedad destaca el hecho de que las células fotovoltaicas se integran en el PCB directamente. En un panel fotovoltaico las células se sitúan en un sustrato llamado *backsheet*, mientras que en este dispositivo se montan directamente sobre el circuito impreso, que es el que hace la función de sustrato. Esto permite automatizar el montaje de las células y permite conseguir un producto final más compacto y competitivo.

Se dispone de un módulo con 10 células en serie. El módulo en su conjunto se caracteriza por los siguientes parámetros:

- Tensión de circuito abierto **Voc: 6.1 V**
- Corriente de corto circuito **Isc: 143.2 mA**
- Tensión de punto de máxima potencia **Vmpp: 5.0 V**
- Corriente de punto de máxima potencia **Impp: 132.8 mA**
- Máxima potencia **Pmpp: 664.0 mW**
- Fill-factor **FF: 76.0 %**
- Eficiencia **η : 14.2%**

En la Figura 26 puede apreciarse la gráfica de la caracterización del módulo y puede verse su punto de máxima potencia (MPP). Esta caracterización se ha realizado utilizando el equipo ABET Technologies Sun 2000 Solar Simulator.

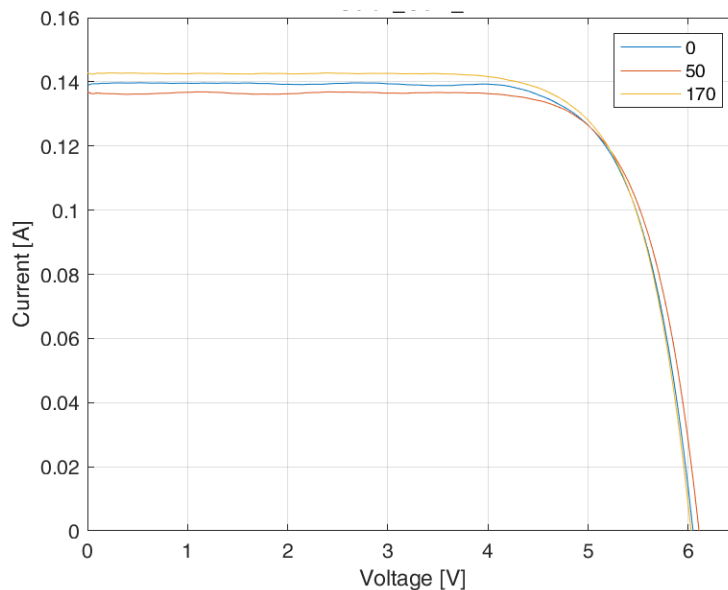


Figura 26. Caracterización de módulo fotovoltaico en función del número de ciclos térmicos (Valencia Nanophotonics Technology Center, 2019).

Las células fotovoltaicas, o solares, suelen caracterizarse como generadores de corriente con una impedancia de salida elevada, ya que hay una gran variación de tensión para pequeñas variaciones de corriente.

Como puede apreciarse en la Figura anterior, utilizando diez células fotovoltaicas en serie, el punto de máxima potencia se encuentra en torno a los 5 V. Esta será la tensión a la cual será posible aprovechar la máxima energía que generen las células. Es un valor adecuado como entrada para un convertidor de tensión que la reduzca hasta los 3.3 V requeridos por el microcontrolador y el resto de sistemas.

Debe tenerse la precaución de no permitir que la corriente circule en sentido contrario y polarice las células en sentido inverso, si esto ocurriera las células fotovoltaicas emitirían luz en el espectro infrarrojo y se calentarían. Para evitarlo se utiliza un diodo Schottky en serie con el módulo.

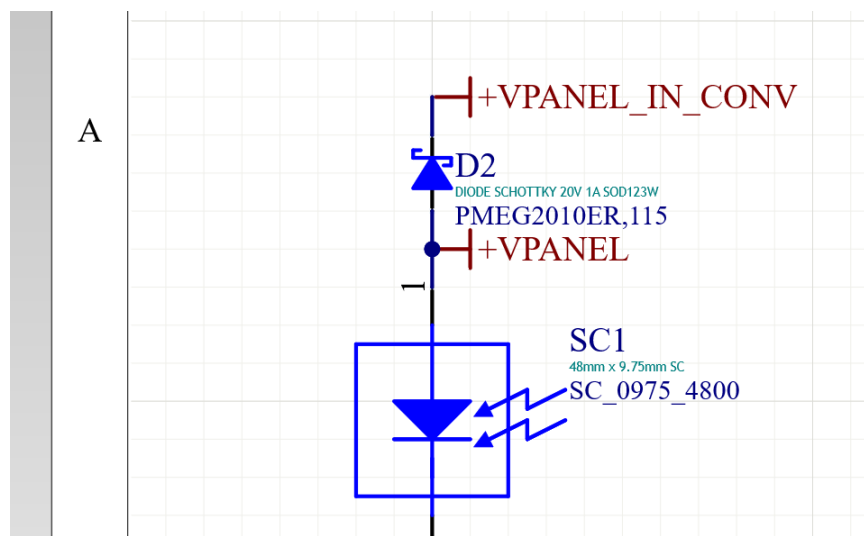


Figura 27. Diodo Schottky en serie con el módulo fotovoltaico para evitar circulación inversa de corriente (Elaboración propia).

2.1.5 Sistema de Gestión y Almacenamiento de Energía

El sistema de gestión y almacenamiento de energía consta de tres elementos: El integrado de gestión de la energía, la fuente de alimentación externa y la batería (Figura 28).

El circuito integrado de gestión de la energía o PMIC se ocupa de gestionar la energía y suministrarla en unas condiciones aceptables para el resto de sistemas. Es habitual que se nombre VDD a la *net* que alimenta la electrónica digital. La energía gestionada por el PMIC puede provenir de la batería, de la fuente de alimentación externa o de las células fotovoltaicas. Este circuito integrado también se ocupa de la carga de la batería.

La fuente de alimentación externa permite alimentar la tarjeta electrónica de una manera alternativa a las células fotovoltaicas, utilizando para ello energía eléctrica proporcionada por un alimentador externo. En cuanto a la batería, esta será necesaria como respaldo cuando ninguna de las fuentes de energía se encuentre disponible.

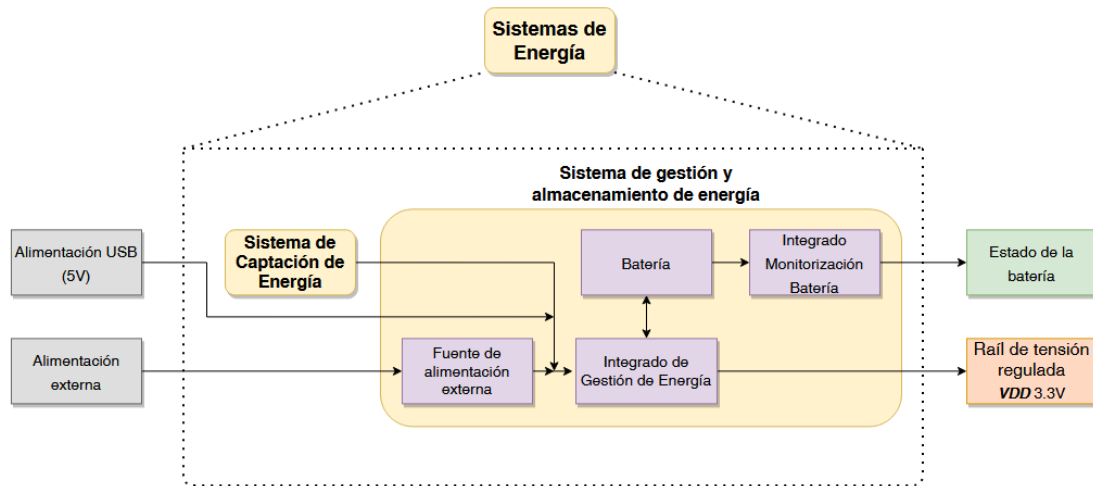


Figura 28. Sistemas de energía del dispositivo diseñado (Elaboración propia).

Circuito integrado de gestión de la energía

Como se ha mencionado, este integrado tendrá la misión de suministrar corriente para el funcionamiento de todos los sistemas funcionales del dispositivo (microcontrolador, radiocomunicaciones y geoposicionamiento). Otra de las funciones es la de cargar la batería a partir de la corriente generada por los paneles solares o que sea suministrada de manera externa.

Este tipo de circuitos integrados, que gestionan en el mismo chip tanto la energía del dispositivo como la carga de la batería, pueden encontrarse en los catálogos mencionados como *Energy Harvesting ICs* o PMIC. Internamente se componen de un convertidor de tensión con una alta eficiencia y otras funcionalidades para gestión de la batería. Suelen estar diseñados para dispositivos de pequeña potencia y bajo consumo que generalmente son portátiles, por ello no es de esperar que puedan funcionar con grandes rangos de tensión o intensidad.

Se han buscado soluciones de cuatro fabricantes distintos, todas ellas relativamente similares, para maximizar la eficiencia se utilizan convertidores de tensión.

Los factores más interesantes a tener en cuenta para realizar la comparativa son:

- Rango de tensión de entrada **V_{in}**
- Rango de tensión de salida **V_{out}**
- Corriente de entrada **I_{in}**
- Corriente de salida **I_{out}**
- Capacidad de encontrar el punto de máxima potencia del sistema de captación de energía (MPPT)

Tabla 5. Características técnicas principales de los integrados de gestión de energía analizados.

P/N	Rango V_{in} (V)	Rango V_{out} (V)	I_{in} (mA)	I_{out} (mA)	MPPT
LTC3106	0.3-5.1	1.8-5	-	100-300	NO
MAX20361	0.3-2.5	4-4.75	100	-	SI
BQ25504	0.13-3	2.5-5.25	100	100	SI
ADP5090	0.08-3.3	2.2-5.2	195	-	SI

La mayoría de estos circuitos integrados están pensados para ser usados con un pequeño número de células fotovoltaicas, con las que se obtiene una tensión baja; cada célula fotovoltaica tiene una tensión en circuito abierto de 0.6 V. El circuito integrado convierte el suministro de corriente a unos niveles aptos para alimentar los sistemas del dispositivo que consumen la energía. Por esta razón y como se aprecia en la tabla comparativa anterior, el rango de tensión de alimentación comienza en niveles muy bajos, pero no abarca, por lo general, niveles mayores de 3 V.

Las condiciones de suministro son muy parecidas en todos ellos, con tensiones máximas del orden de entre 5-6 V, lo que permite alimentar circuitos integrados estándar de 5 V. La corriente máxima de estos integrados se encuentra en torno a 100 mA, a excepción del LTC3106 cuando se hace funcionar en un modo más potente.

De los integrados analizados se selecciona el LTC3106, el único que cumple con los requisitos de tensión de entrada que generan las células fotovoltaicas en serie.

- Integración en el dispositivo diseñado

Este es un convertidor bastante complejo en el que se puede configurar el comportamiento modificando el estado lógico de algunos pines. El ajuste de la tensión de salida V_{out} , que será la tensión suministrada al resto de sistemas, se realiza mediante los pines OS1 Y OS2 (Tabla 6). Esta tensión se ajusta a 3.3 V.

Tabla 6. Selección de la tensión de salida del integrado LTC3106 (Linear Technology, 2015).

OS1	OS2	OUTPUT VOLTAGE
0	0	1.8V
0	V_{CC}	2.2V
V_{CC}	0	3.3V
V_{CC}	V_{CC}	5V

Los pines SS1 Y SS2 determinan la tensión de almacenamiento de la batería (V_{store}), 4V adecuada para tecnología de polímero de Litio.

Tabla 7. Selección de tensión de la batería (Linear Technology, 2015).

PRI	SS1	SS2	V _{STORE} / V _{CAP OV}	V _{STORE} / V _{CAP UV}	BATTERY TYPE
0	0	0	4V	2.78V	Li Carbon
0	0	V _{CC}	2.9V	1.9V	2x Rechargeable NiMH
0	V _{CC}	0	3V	2.15V	Rechargeable Li Coin Cell
0	V _{CC}	V _{CC}	4V	3V	Li Polymer/Graphite
V _{CC}	0	0	4.2V	2.1V	Primary, Non-Rechargeable

El pin PRI sirve para indicar al PMIC si se está utilizando una batería primaria (no recargable) o secundaria (recargable). Si este pin se une a VCC (*Primary battery enabled*) no se efectuará carga de la batería. En este caso se utiliza batería, por tanto, este pin será configurado con un cero lógico y se conectará a masa (GND).

La funcionalidad ILIMSEL limita la corriente máxima de entrada al integrado. Esta limitación es necesaria para una fuente de energía con alta impedancia (Linear Technology, 2015), para lo que se une el pin ILIMSEL a masa. Si no estuviera limitada se podría llegar a demandar una gran cantidad de corriente, por lo que la tensión de las células fotovoltaicas durante ese pico de corriente se reduciría y la potencia entregada por las células fotovoltaicas sería muy baja (véase Figura 26).

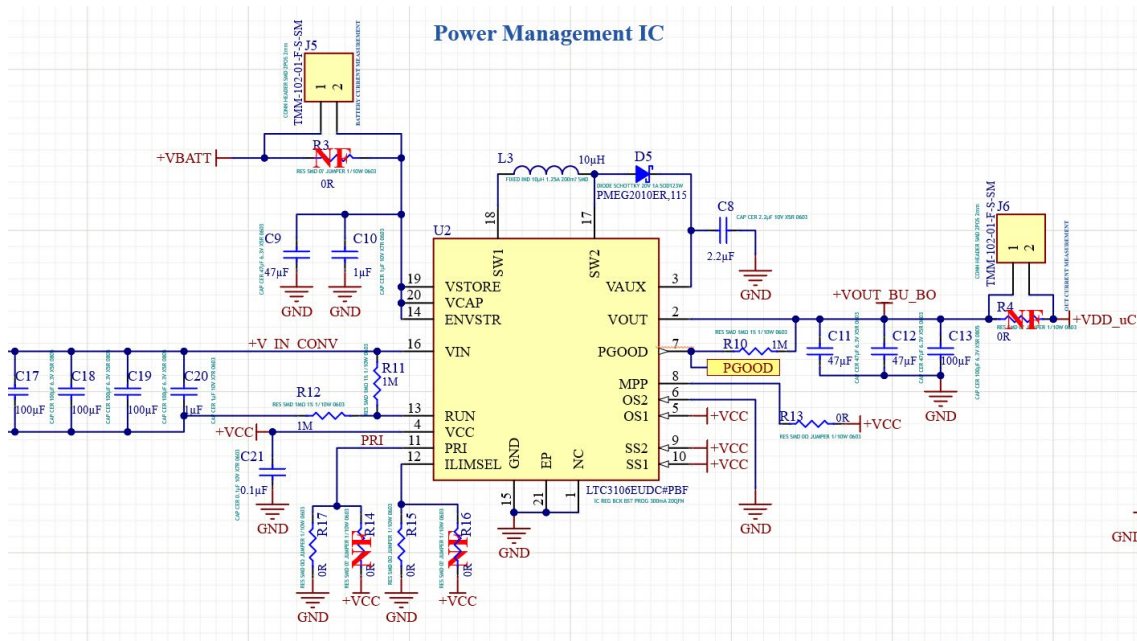


Figura 29. Esquema eléctrico de la conexión del integrado de gestión de energía LTC3106 implementado en el dispositivo (Elaboración propia).

Para una fuente de energía intermitente y con una impedancia muy alta, como son las células fotovoltaicas, el fabricante recomienda en la hoja de características del LTC3106 incorporar una capacidad de entrada al convertidor mayor de 100 μ F. Además, para el caso particular en el que exista una carga pulsada, Linear Technology recomienda una capacidad de entrada al integrado todavía mayor, de forma que durante la transmisión de datos no se tenga necesidad de consumir energía de la batería, evitando así el deterioro de esta. Esta capacidad se consigue combinando

en paralelo condensadores con baja ESR de alta capacidad con uno de pequeño tamaño para poder filtrar mejor el ruido de alta frecuencia.

La capacidad del condensador necesaria a la salida del convertidor depende del perfil de consumo del dispositivo diseñado, que a su vez dependerá del patrón o perfil de RF. Puesto que la corriente máxima de salida de este convertidor es de 100 mA. Según se observa en la hoja de datos del módulo RFM95W (HopeRF, 2013), se requiere una corriente de 100mA cuando se realiza una transmisión con una potencia de 20 dBm. Si a este valor se suma el valor de la corriente consumida por el resto de sistemas de la tarjeta, como el microcontrolador o módulo GNSS, se obtiene una intensidad máxima del orden de 110-115 mA. Por tanto, en los momentos en los que el dispositivo transmita y consuma más corriente de la suministrada por el convertidor, será necesario un aporte de corriente adicional por parte de otro elemento. Este aporte se hace mediante condensadores cuya capacidad se sobredimensionan tanto a la entrada como a la salida del convertidor, teniendo en cuenta el uso previsto para el dispositivo (muRata, 2016).

- Selección del inductor

El fabricante recomienda en su hoja de datos el uso de un inductor de 10 μ H para la mayoría de aplicaciones. Si la tensión de entrada es muy baja es recomendable utilizar un inductor de mayor tamaño. Aunque este no va a ser el caso, ya que las 10 células generan tensiones relativamente altas en condiciones de buena luminosidad. Se considera el inductor LPS4018-103MRC del fabricante Coilcraft, que es uno de los recomendados por el fabricante en su hoja de datos.

Alimentación externa

El diseño incluye la posibilidad de alimentar la tarjeta de manera externa, por si existiera disponibilidad de acceso a otras fuentes de energía eléctrica y el sistema de captación de energía de la tarjeta no fuera necesario.

Siguiendo el esquema de la Figura 28, la energía obtenida de la fuente externa servirá para alimentar la tarjeta a través del LTC3106, por lo que deben tenerse en cuenta sus especificaciones eléctricas. La tensión de entrada máxima admitida por el integrado de gestión de la energía es de 5.1 V (Tabla 5), por ello será necesaria una fuente de alimentación que adapte las características de la energía eléctrica proveniente de la fuente externa a unos parámetros que pueda admitir dicho integrado.

Los requisitos que debe cumplir este sistema de alimentación externa son, en primer lugar, que la tensión de salida sea de 5 V. Esta es una tensión de entrada adecuada para el LTC3106 y según puede verse en las gráficas de su hoja de datos, con esa tensión de entrada su eficiencia es elevada.

En segundo lugar, la entrada de la alimentación externa tiene que admitir la tensión suministrada por los alimentadores externos más habituales. Este tipo de alimentadores, que se encuentran ampliamente extendidos y suelen utilizar un conector de tambor de 5,5 mm, suele suministrar tensiones que oscilan entre 8 y 12 V. Este valor de tensión se tendrá de referencia, por lo que, dejando un margen de seguridad, el dispositivo diseñado deberá ser capaz de admitir una tensión de alimentación externa de 14V.

En cuanto a la corriente que deba suministrar, dependerá de la corriente total demandada por el sistema en su conjunto. La corriente máxima demandada por el sistema vendrá dada por el consumo de la batería cuando se encuentre cargando sumado al del módulo de radio transmitiendo un mensaje. Este valor se estima en unos 200 mA, 100 en el raíl de 4,2V de carga de la batería y otros 100 en 3.3V a la salida del convertidor. Con este dato puede calcularse la intensidad de entrada al integrado de gestión de energía, que resulta 185mA (véase apartado E.1 del Anexo E).

Existen varias soluciones posibles, pues el consumo de corriente no es muy elevado. La más sencilla podría ser utilizar un regulador lineal, mientras que la solución más compleja sería utilizar un convertidor de tensión.

En caso de utilizar un regulador de tensión lineal, la potencia P disipada en el regulador puede calcularse como:

$$P = I_{in} \times V_{drop}$$

Donde I_{in} es la intensidad de entrada al regulador y V_{drop} es la caída de tensión producida en el regulador.

Si como ha sido anteriormente mencionado las tensiones de suministro de un alimentador externo oscilan entre 9 y 12 V, la caída de tensión o *dropout* generada será de 4 a 7 V para una tensión de salida de la fuente externa de 5V. Esto arroja una eficiencia menor del 50% cuando la tensión de alimentación es más elevada.

Por el contrario, con un convertidor de tensión es habitual obtener una eficiencia del 85 o 90% de eficiencia en estas condiciones, pues no disipa la caída de tensión en forma de calor. La elección de un regulador de tensión lineal fijo, suele ser una solución de un solo componente, por el contrario, la elección de un convertidor de tensión requiere de componentes adicionales. Esto último puede encarecer el producto ya que supone una mayor cantidad de líneas en la lista de montaje.

Analizando estos factores se considera que las ventajas del convertidor de tensión sobrepasan sus inconvenientes y se adopta esta solución por su mayor eficiencia energética.

Realizando un cribado en catálogo se han seleccionado algunos convertidores de tensión *step-down*, convertidores que reducen la tensión de entrada, con una tensión de salida de 5 V y que aceptan las tensiones de entrada requeridas. En la siguiente tabla se comparan algunos de ellos. La eficiencia indicada se da para $V_{in}=12$ V y $V_{out}=5$ V, F_{sw} es la frecuencia de conmutación del convertidor.

Tabla 8. Comparativa de los distintos convertidores de tensión analizados

P/N	Rango Vin (V)	Eficiencia	Iout (A)	Fsw (kHz)	Precio (€)
MC34063A	3-40	80-90	1.5	100	0.195
AP62301Z6	4.2-18	92	3	750	0.18
AP62250Z6	4.2-18	88	2.5	1300	0.18

Todos los integrados cumplen con los requisitos de tensión y corriente demandados con unos valores de rendimiento similares y aceptables. La diferencia de precio tampoco permite una elección clara, ya que los costes unitarios cuando se compran 1000 unidades son muy similares. Sin embargo, sí que existe una gran diferencia en la frecuencia de conmutación de los convertidores de tensión.

Una mayor frecuencia de conmutación permite que el tamaño del inductor sea menor, pues en cada ciclo de carga tendrá que almacenar menos energía, según la fórmula:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}LI^2$$

Donde L es la inductancia de la bobina en Henrios e I es la corriente en Amperios.

Esta es una condición interesante, porque reduce el precio del inductor y generalmente suele tener una resistencia en serie menor, con lo que se reducen las pérdidas por calor y se aumenta el rendimiento del convertidor (Likely, Chris, 2003).

Por esta razón se selecciona el circuito integrado AP62250. Se trata de un convertidor de tipo *Buck* de reciente incorporación en el mercado. Es económico y requiere un bajo número de componentes, pero debe tenerse precaución a la hora de diseñar el circuito impreso.

Las resistencias R1 y R2 del convertidor (Figura 30) se seleccionan con los valores adecuados para 5 V (Diodos Incorporated, 2021)

En lo que respecta a la selección del inductor, el fabricante recomienda un valor de 2.2 μ H para una tensión de salida de 5 V. Teniendo en cuenta que el máximo consumo de energía se dará en condiciones pulsantes por la naturaleza de la carga, que es la transmisión de datos, se puede seleccionar de manera segura el inductor NLCV32T-2R2M-EF. Este tiene una corriente máxima de 770mA, que es superior a la calculada en el apartado E.2 del Anexo E. En la hoja de datos del fabricante del inductor se comprueba que tanto la corriente de saturación como la de sobrecalentamiento no están por debajo de este valor (TDK, 2017).

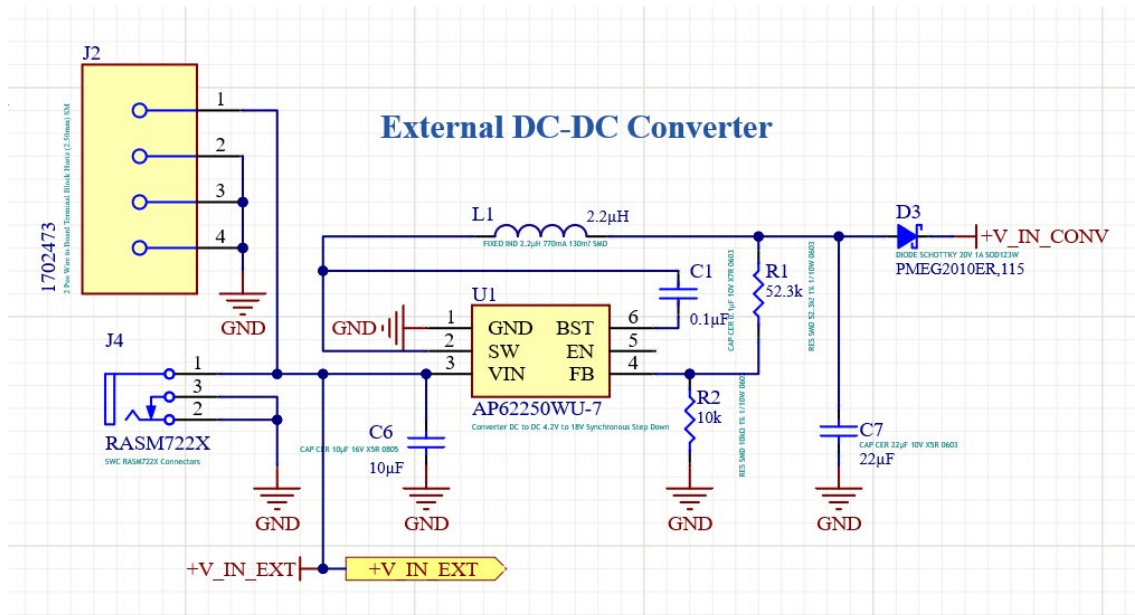


Figura 30. Esquema eléctrico de la implementación del convertidor AP62250WU-7 en la tarjeta diseñada (Elaboración propia).

- Conectores de alimentación

Para garantizar la flexibilidad de uso del dispositivo, la alimentación desde una fuente externa se posibilita teniendo en cuenta los conectores de alimentación más habituales: conector de tambor, conector USB y conector bloque de terminales.

El conector de tambor, más conocido por su nombre inglés *DC barrel connector*, es uno de los conectores más comunes utilizados para alimentación de corriente continua a baja tensión. Suele encontrarse en multitud de dispositivos comerciales que requieren corriente continua para funcionar (*routers, switches, discos duros externos*), en los que la corriente continua es suministrada por un adaptador de alimentación de pared. La facilidad de encontrar este tipo de fuente de alimentación en cualquier lugar es la razón por la que resulta interesante tener la opción de alimentar el dispositivo diseñado con ella.

En el circuito impreso se suele montar la parte fija del conector, el *Jack*. Se toma como referencia de conector el Switchcraft 722, aunque el modelo concreto no resulta importante más allá de especificar las dimensiones mecánicas, puesto que este tipo de conector es suministrado por varios fabricantes y se trata de un estándar industrial *de facto*. Este tipo de conectores se suele catalogar en función del diámetro del tambor y diámetro del pin interior.

Las dimensiones que este conector debe cumplir son:

- Diámetro del tambor: 5,5 mm (Plug); 6,3mm (Jack)
- Diámetro del pin interior: 2 mm (80 mil)

Aunque diversas empresas suministran este tipo de conector y seleccionar un modelo concreto no tiene relevancia más allá de especificar las dimensiones mecánicas, se toma como referencia el Switchcraft 722 en su versión de montaje superficial (RASM722).



Figura 31. Switchcraft RAPC722 (Switchcraft).

Otro tipo de conector muy común para alimentación de energía es el conector micro-USB, aunque está siendo paulatinamente desplazado por el USB-C. A pesar de que el micro-USB ha perdido popularidad respecto al USB-C en el nicho de mercado de los *smartphones* de nueva generación, el micro-USB sigue presente en otros dispositivos de pequeño tamaño.

Realizando una búsqueda en catálogo, limitando los parámetros a conectores de tipos USB-C y USB micro-B y de montaje superficial, se preseleccionan los dos conectores más económicos que cumplen estas condiciones.



Figura 32. Comparativa física entre USB micro-B y USB tipo C (Dreamstime).

Tabla 9. Comparativa de los conectores USB analizados.

P/N	Tipo	Vmax (V)	I _{max} (A)	Precio (€)
10118194-0001LF	USB Micro-B	100V	1	0,279
UBC-R112-56C-7ATS(HF)	USB-C	20	1,25/pin	0,985

Los datos técnicos han sido obtenidos de las hojas de datos proporcionados por los fabricantes, los precios se han obtenido de la web de RS-Components en la fecha de realización del presente proyecto.

Puesto que cuando se utilice este conector se hará desde un adaptador de 5 V y el aporte de corriente será muy reducido por el bajo consumo del sistema, ambos conectores cumplen sobradamente los requisitos de corriente y tensión. Sin embargo, si se otorga un mayor peso al coste del conector, y teniendo en cuenta que tanto el conector USB-C como USB micro-B están muy extendidos, se selecciona el más económico.

En caso de que la fuente de energía a utilizar no disponga de un conector concreto la conexión se realizará mediante un conector de bloque de terminales (*block terminal connector*). Este tipo de conectores dispone de una abertura para introducir un cable que esté acabado en terminales y la sujeción del terminal al conector se asegura con un tornillo que empuja una presilla que agarra el terminal.

La selección de un modelo concreto tampoco es importante para este caso, pues se trata de un tipo de conector muy común cuyo único requisito es permitir la conexión de cables separados a la tarjeta.



Figura 33. Conector terminal de bloque (Mouser).

Batería

La batería será un requisito necesario en aquellos escenarios de uso en los que no se disponga de una fuente de energía permanente. En estos escenarios la energía captada por el propio dispositivo diseñado o por otro elemento exterior se almacenará en la batería. Por el contrario, si el nodo LoRa se utiliza en una aplicación en la que se disponga de acceso a la red eléctrica, cómo es el caso de una luminaria, no será necesaria una batería para alimentar la tarjeta. Para permitir ambos modos de funcionamiento una resistencia de 0Ω selecciona si se carga la batería o no (Figura 29).

Otra consideración que debe hacerse tiene relación con la temperatura de utilización de la batería. En el caso de que la tarjeta desarrollada tenga que captar energía del sol, la exposición a la luz solar provocará altas temperaturas a las que podría verse expuesta la batería. Esto es algo que debe evitarse a toda costa, ya que las altas temperaturas degradan las baterías de litio (Battery University, 2019).

No solo las altas temperaturas son perjudiciales para las baterías, las bajas temperaturas también provocan efectos no deseados. Las temperaturas frías incrementan la resistencia

interna de la batería y reducen su capacidad. Si la temperatura desciende por debajo de 0°C las baterías de litio ion no admiten nada de carga (Battery University, 2019). Este incremento de la resistencia interna reduce el rendimiento de los ciclos de carga y descarga, por ello habrá que sobredimensionar la capacidad de las baterías en aquellas aplicaciones en las que se prevea una utilización del dispositivo a bajas temperaturas.

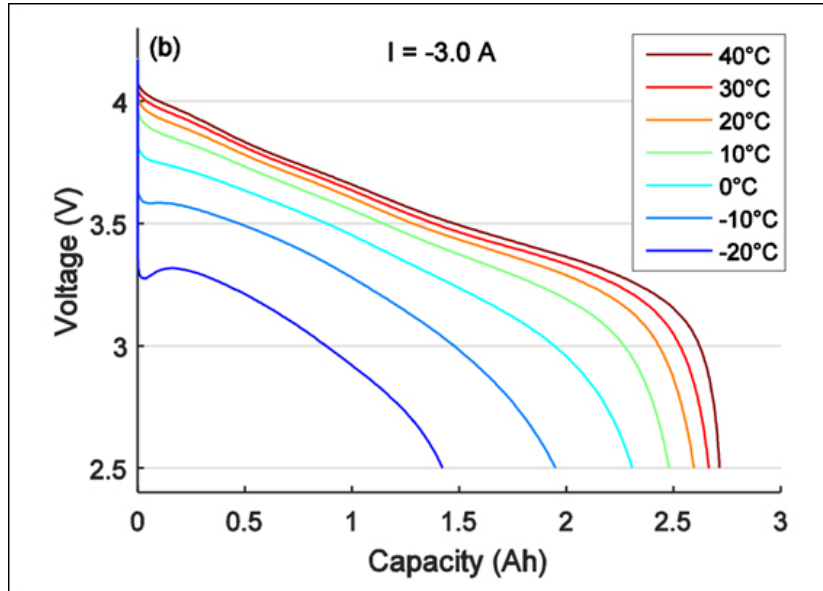


Figura 34. Tensión de una célula de Litio Ion con corriente de descarga de 3A a distintas temperaturas (Battery University, 2019).

Por estos motivos, la batería no puede situarse en la cara superior de la tarjeta, pues está directamente en contacto con las células fotovoltaicas y se espera que alcance altas temperaturas. La batería se conecta de manera externa con la ayuda de un conector y se ubica en una posición en la que se encuentre sometida lo menos posible a las variaciones externas de temperatura.

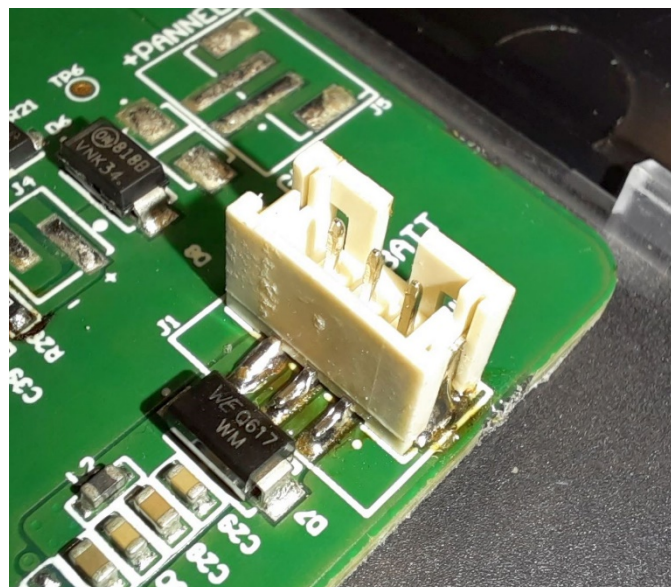


Figura 35. Conexión para batería externa (Elaboración propia).

La elección de un modelo de batería concreto no es un factor importante. Únicamente debe tenerse en cuenta que el integrado de gestión de energía del que dispone el nodo LoRa solo puede cargar baterías de una sola célula y puede ajustarse para cargar distintos tipos de baterías. Las baterías de Litio Polímero suelen tener formas más planas que pueden adaptarse al diseño del dispositivo, por el contrario, las baterías de Litio Ion suelen tener formas más cilíndricas que dificultan su uso en dispositivos de pequeño tamaño. La batería seleccionada dependerá de cada aplicación.

La capacidad de la batería puede calcularse como el producto de la corriente consumida por el dispositivo (A) y el número de horas de oscuridad en las que se consume corriente de la batería.

$$C_d = I_{load}t_d$$

A la fórmula anterior habría que sumarle también las pérdidas debidas al rendimiento de la carga y descarga de la batería. Este rendimiento varía dependiendo de la tecnología de la batería y se encuentra en torno al 80-90 %.

Integrado de monitorización de la batería, Fuel Gauge (MAX17260)

La incorporación de este integrado al sistema permite conocer en todo momento el estado de la batería del nodo LoRa. A través de bus I2C se puede acceder a los registros para monitorizar la batería; capacidad, temperatura, estado de vida y tiempo restante hasta descarga son los parámetros que se pueden conocer.

La deriva térmica es un factor a tener en cuenta en una aplicación como la luminaria, ya que se esperan unas temperaturas elevadas debidas a la radiación solar. Mediante la adición de un termistor de tipo NTC puede medir la temperatura de la batería y efectuar las correcciones pertinentes que permitan compensar dicha deriva. Para este caso se permite la opción de conectar un termistor externo que no se encuentre integrado en la tarjeta diseñada. Alternativamente, y en caso de que no vaya a ser usado el termistor, este integrado estima la temperatura de la batería midiendo la temperatura de su propio encapsulado.

Este integrado se comunica con el microcontrolador a través de bus I2C. La conexión con el microcontrolador, que actuará de *host*, se hace a través de líneas de comunicaciones que deben contar con una resistencia de *pull-up* (Texas Instruments, 2015). El valor de estas resistencias debe encontrarse entre unos valores mínimos y máximos para garantizar la integridad de la señal de comunicación; deben cumplirse unos tiempos de cambio de nivel estipulados dentro de una ventana. Para este caso se optará por el valor máximo de resistencia de *pull-up* para minimizar el consumo energético. Un valor estándar suele ser 4.7 kΩ para una alimentación de 3.3 V. Si tras un tiempo de uso se comprueba que la comunicación no es correcta por ser la capacitancia de la línea mayor estos valores podrán reemplazarse en cualquier momento.

Tras haber seleccionado los componentes, el sistema queda funcionalmente descrito con el siguiente diagrama. Este diagrama está localizado en el Anexo B, a continuación se muestra una previsualización.

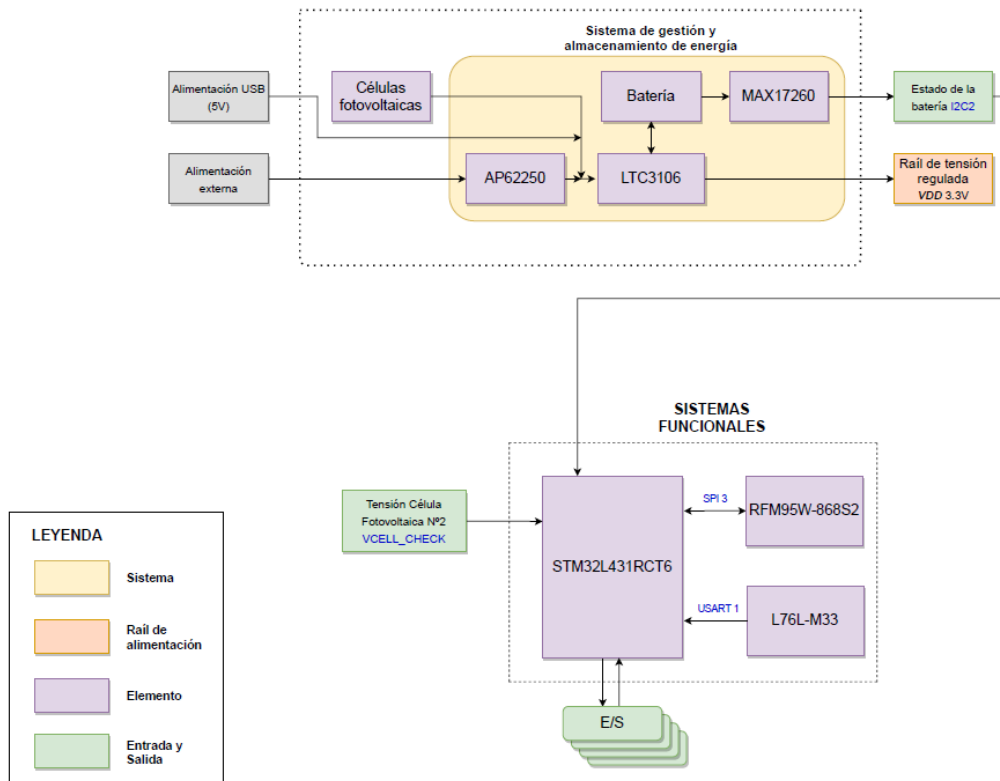


Figura 36. Diagrama detallado de los componentes del Nodo LoRa (Elaboración propia).

Para poder ampliar las funcionalidades de este dispositivo y tener la posibilidad de añadir otros periféricos se deja abierta la posibilidad de instalar una tarjeta de expansión, que corresponde al módulo E/S de la Figura 36.

2.2 Gestión de la energía

La gestión de la energía en un dispositivo resulta sumamente importante. Por ello se llevan a cabo ciertas acciones.

Punto de máxima potencia de la fuente de energía solar (MPP)

Las células fotovoltaicas suelen modelarse en cierto rango de su funcionamiento como generadores de corriente con una alta resistencia interna (zona naranja de la Figura 37). Estos dispositivos no funcionan de manera óptima en el punto de máxima corriente, ya que la tensión en esta situación es próxima a 0 V y por tanto el producto de la tensión por la corriente es nulo.

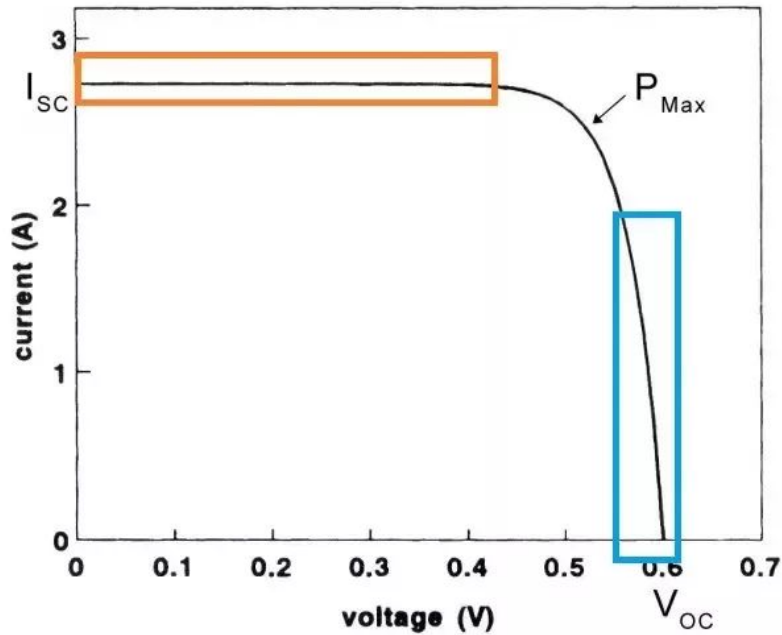


Figura 37. Curva típica de célula fotovoltaica.

Para evitar esto es interesante que las células fotovoltaicas se encuentren en el punto de máxima potencia, que está situado en la zona del codo de la gráfica. El valor de la tensión en este punto es estimado en ocasiones como el 80% de la tensión de circuito abierto (Texas Instruments, 2010), cifra que se puede contrastar con el valor obtenido para las células instaladas en el dispositivo diseñado, en las que la tensión de dicho punto es el 82% de la tensión de circuito abierto.

Sin embargo, tanto la tensión en circuito abierto V_{oc} como la corriente de cortocircuito I_{sc} dependen de la irradiación que recibe la célula fotovoltaica; el punto de máxima potencia no es constante. La relación entre I_{mpp} (Intensidad en el punto de máxima potencia) y la radiación solar es lineal para una irradiación superior a 50 W/m^2 (Solar energy radiation measurement with a low-power solar energy harvester, 2018).

El integrado que gestiona la energía en el dispositivo diseñado no incorpora funcionalidades de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), sin embargo, sí que dispone de un ajuste de nivel de tensión de arranque. Según la caracterización de todo el módulo fotovoltaico (Figura 26) y mediante la realización de algunas pruebas en el laboratorio se llega a la conclusión de que la tensión a la que se produce el máximo aporte de potencia es superior a 1.2 V para todos los niveles de radiación. De esta manera, se ajusta el integrado de administración de la energía para que únicamente consuma energía aportada por el módulo fotovoltaico cuando la tensión sea superior a 1.2 V . Esto se hace mediante la adición de un divisor resistivo en el pin RUN (Figura 29). En el apartado E.3 del Anexo E se calculan los valores de las resistencias para este modo de operación, resultando ambas resistencias de $1 \text{ M}\Omega$.

Con esta configuración, para que el integrado consuma corriente de los paneles solares hacia el integrado debe existir un voltaje mayor a $1,2 \text{ V}$. Si en algún momento la tensión cae por debajo de 1 V el integrado dejaría de consumir corriente del módulo solar hasta que este sean capaz de cargar los condensadores de entrada del convertidor a una tensión superior al umbral de $1,2 \text{ V}$.

2.3 Precauciones contra descargas electrostáticas (ESD) y otras consideraciones

Descargas Electrostáticas

El roce de materiales aislantes genera cargas estáticas que se depositan en su superficie y, si entran en contacto con algún elemento conductor, pueden liberarse de manera súbita. Este fenómeno es conocido como descarga electrostática, o ESD, y es especialmente dañino para los circuitos integrados, ya que son sensibles a las altas tensiones generadas por las cargas estáticas.

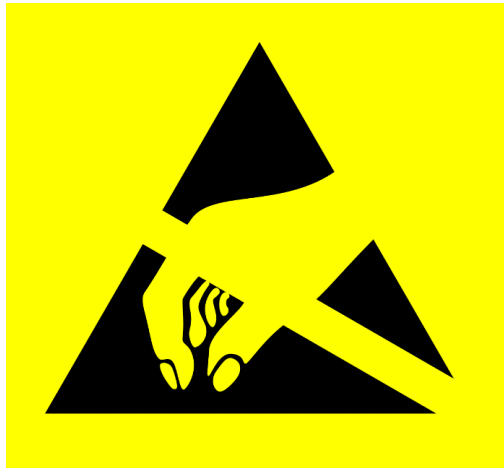


Figura 38. Pictograma de dispositivo sensible a descargas electrostáticas (Wikimedia Commons, 2007).

La manipulación de componentes electrónicos basados en semiconductores es un proceso crítico, por ello las personas deben seguir ciertas precauciones. Esto es algo que se tiene en cuenta para el nodo LoRa que se diseña en el presente proyecto.

Las zonas de la tarjeta susceptibles de ser tocadas por las manos de alguna persona son la batería y el conector JTAG. Cada vez que se cambie la batería o se conecte el programador a la tarjeta existe riesgo de que se descarguen a la tarjeta las cargas acumuladas por la persona a través de estos pines.

Existen ciertos componentes electrónicos diseñados para derivar a masa a través de ellos la corriente provocada por las cargas estáticas. Estos son los llamados diodos protectores de ESD, diodos Zener que se colocan en paralelo con el elemento a proteger. Utilizando estos componentes se evita el riesgo asociado a la manipulación de la tarjeta, sin que se deban seguir mayores precauciones. Se utilizan diodos ESD para proteger de contactos accidentales con el conector JTAG (Figura 39) y el conector de la batería.

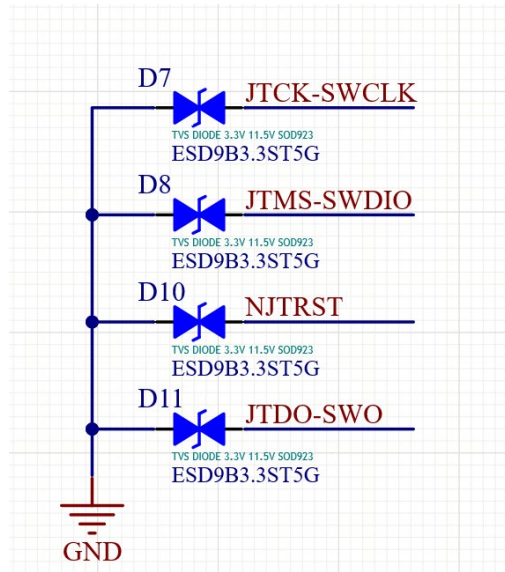


Figura 39. Diodos para protección de descargas electrostáticas instalados en las líneas del bus JTAG (Elaboración propia).

Protección de sobretensiones en el integrado de gestión de energía

Como se observa en la Figura 26, los paneles generan mayor tensión en circuito abierto que la que el circuito integrado de gestión de energía es capaz de soportar. En el peor de los casos, en circunstancias de ambiente soleado y sin consumo de energía, el módulo solar podría generar una tensión en circuito abierto de 6.1 V. Este es un valor superior a la tensión máxima recomendada para el integrado LTC3106, que es de 5.1 V.

Aunque no se trate estrictamente de protección contra descargas electrostáticas, se requiere un elemento que realice una función muy similar a la que realizan los diodos de protección ESD; la función de derivar a tierra la corriente generada por el módulo solar si los sistemas de la tarjeta no consumen corriente. De esta forma se evita que llegue a producirse una tensión mayor a la máxima admitida por el integrado, ya que al haber un consumo de energía a través de este elemento la tensión en bornas de conexión del módulo fotovoltaico sería menor a la de circuito abierto.

Por ello se dispone en paralelo de un Zener que permita el paso de corriente a 5.1V y asegure que esa tensión no llegue a excederse. En un primer momento se valora la utilización de un SMB5918BT3G, con una tensión nominal Zener de 5.1V. Cruzando la gráfica de comportamiento del diodo Zener con la del módulo fotovoltaico (Figura 26) se tiene la tensión que tendrá el Zener cuando no exista consumo de energía por parte de ningún sistema.

Cuando este diodo se polariza con la tensión Zener $V_z = 5.1$ V circula una corriente de 73.5 mA a través de él (ON Semiconductor, 2006). Sin embargo, el módulo fotovoltaico genera una corriente de 120mA para ese valor de tensión, por lo que, si no hay consumo por parte de ningún sistema de la tarjeta, la tensión producida por el módulo solar aumenta y de la misma manera hace la corriente del diodo Zener. De esta manera se alcanza un punto de equilibrio que varía en función del consumo instantáneo del dispositivo.

Aunque eventualmente la tensión en los bornes de conexión del módulo fotovoltaico pudiera alcanzar valores mayores a la cifra de 5.1 V no ocurriría ningún problema, ya que, en serie y

anterior a la entrada de integrado de gestión de energía se encuentra el diodo Schottky mencionado en el apartado 1.5.3, que generará una caída de tensión de 0.2 V.

También debe tenerse en cuenta la disipación de energía en el Zener, la tensión se conoce teniendo en cuenta que toda la corriente generada por el módulo fotovoltaico circularía a través del diodo Zener, que sería de 120 mA para una tensión de 5.1 V; aunque cabe esperar que la tensión sería algo mayor, ya que la tensión Zener nominal se da para una corriente de 73.5 mA, según puede leerse en el *datasheet*. Esta mayor tensión haría que la corriente generada por el panel fuese menor.

La potencia disipada puede calcularse como:

$$P = V_z \times I_{pv}$$

Cruzando gráficas de diodo Zener y módulo solar se estima una tensión de Zener $V_z = 5.2$ V y la corriente $I_{pv} = 110$ mA.

De este cálculo resulta una potencia de 0.57 W, estando especificado el SMB5918BT3G para una disipación de 3 W se considera que el margen de seguridad es bastante amplio.

Por problemas de disponibilidad de componentes se considera también el diodo Zener ZM4733A-GS18. Este diodo utiliza el encapsulado DO-213AB, pero podrá utilizar el *footprint* del formato SMB del SMB5918BT3G.

2.4 Desarrollo de firmware

Antes de programar el firmware, cabe plantearse cuál debe ser el comportamiento del dispositivo. Este comportamiento debe estar basado en las capacidades que se desean conseguir, pero está limitado por el hardware del que se dispone y por otros factores; una parte muy importante del producto está ligada a la transmisión de datos utilizando LoRa.

Existen varias redes públicas LoRaWAN, pero la más extendida es The Things Network. Para poder hacer uso de esta red deben cumplirse no solo la normativa de la ETSI respecto al uso de las bandas destinadas a ISM, sino también las propias de TTN.

Una de las normas más restrictivas que afectarán al diseño del software es que únicamente pueden realizarse 10 mensajes de *downlink* por nodo; por otra parte, la librería utilizada MCCI LMIC, que significa LoRa MAC in C, únicamente soporta dispositivos que se comportan como clase A. Los dispositivos de clase A únicamente tienen una ventana para recibir información de *downlink* cuando acaban de transmitir, por lo que habrá que tener esto en cuenta.

También es posible comunicar varios dispositivos utilizando únicamente el protocolo LoRa si no se requiere que los datos del dispositivo sean directamente accesibles a través de internet.

De esta manera las únicas limitaciones a las que debe atenderse son las impuestas para las bandas ISM.

En el apartado 3.2 se detalla el código desarrollado para la aplicación de nodo luminaria utilizando LoRa como método de comunicación .

2.5 Diseño del circuito impreso

A lo largo del apartado 2.1 se ha definido la interconexión de los componentes del sistema mediante la definición del esquema eléctrico. El paso siguiente es determinar cómo se van a realizar físicamente estas conexiones en el circuito impreso.

2.5.1 Criterios y nomenclatura a utilizar para realización de documentación.

Para realizar la captura esquemática y el diseño del circuito impreso se utiliza el paquete de software *Altium Designer*.

A la hora de mencionar los componentes que pertenecen al diseño en la lista de materiales y en el esquema eléctrico, se toma en consideración IEEE Std 315-1975 e IEEE Std 200-1975 para nombrar los designadores de referencia. Los designadores de referencia son etiquetas únicas creadas secuencialmente que identifican cierto elemento del sistema y permiten referirse a él de manera unívoca en la documentación.

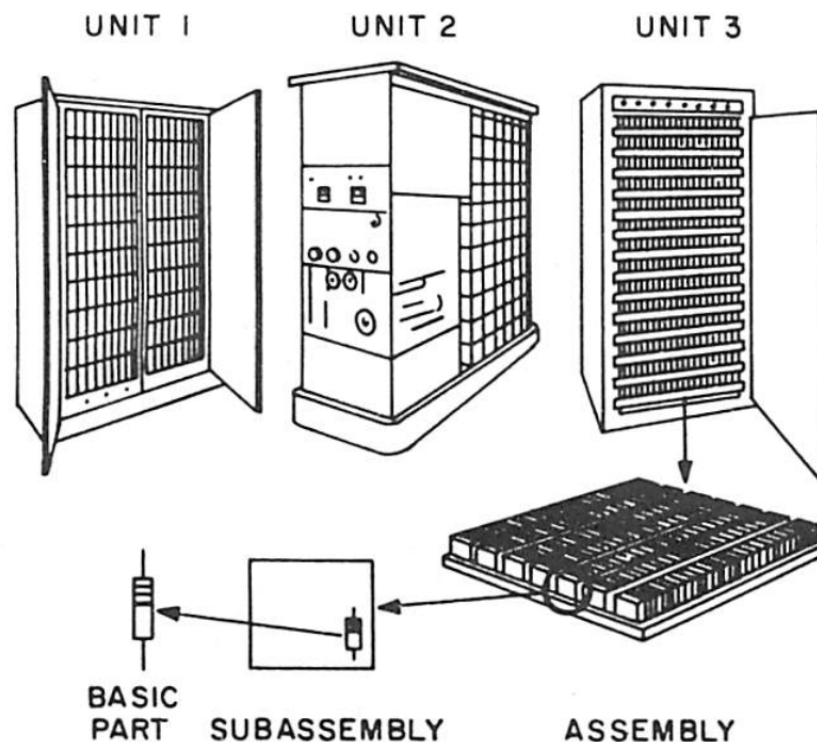


Figura 40. Subdivisiones de una unidad de equipo electrónico (*American National Standards Institute, 1975*).

Siguiendo esta norma pueden identificarse todos los elementos del sistema tal y como muestra la Figura 40. Si el nodo LoRa se considera una Unidad del sistema (representada como un número de identificación único), la tarjeta desarrollada estaría dentro de la unidad y sería un *assembly* (representada con la letra de designación de clase A seguida de un número de identificación único) y el microcontrolador que se encuentra montado en la tarjeta sería un *inseparable assembly* (representado con la letra de clase U y un número de identificación único)

- El microcontrolador es el *inseparable assembly* número 1, por tanto, su designador de referencia es el **U1**
- La tarjeta desarrollada a lo largo del proyecto es el *assembly* número 1 y su designador de referencia es **A1**
- El nodo LoRa al que se hace referencia es la unidad **1**

Siguiendo ese esquema el microcontrolador de este nodo se referencia como **1A1U1**

Si se considera un sistema en el que existan varios nodos LoRa, esto es, varias unidades distintas, esta sería la clasificación desde el punto de vista global del sistema que permitiría referirse a cualquier elemento del sistema de manera única. Sin embargo, cuando se diseña la tarjeta se pone el enfoque en ella. Por ello, a la hora de nombrar los elementos de la tarjeta solo se hace referencia a la parte de los designadores que se encuentran jerárquicamente por debajo de ella (Por ejemplo U1, R3 o L1).

2.5.2 Generación de la *netlist*

Una vez se ha producido la captura del esquema eléctrico queda definida la jerarquía entre los distintos componentes del sistema, que quedan interconectados unos a los otros por lo que se conoce como *nets*. Una *net*, en español red o línea, es un elemento con un identificador único y exclusivo que define la interconexión de pines de componentes únicos. En la Figura 41 se muestra un fragmento de esquema eléctrico en el que la net N00233 interconecta dos componentes.

La totalidad del esquema eléctrico puede definirse por su lista de nets, o *netlist*, que es un archivo de texto donde se listan todas las conexiones entre componentes.

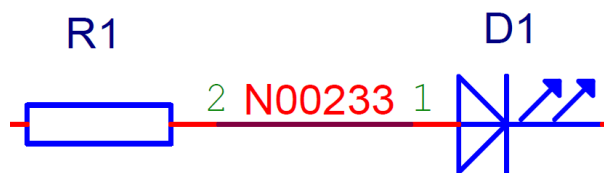
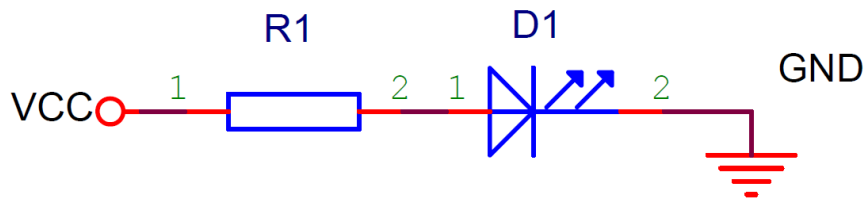


Figura 41. Etiqueta de la net de un esquema eléctrico (elaboración propia).

A continuación, se muestra un sencillo esquema eléctrico junto con la *netlist* que se genera a partir de él. Existen múltiples formatos de *netlist*, cada tipo de software de edición de PCB utiliza un formato propio, aunque ha habido algunos intentos por crear un formato estándar. En este caso se ha generado una *netlist* en formato de P-CAD, uno de los más sencillos de comprender.



```
1 BOARD = ORCAD.PCB;  
2  
3 PARTS  
4 LED = D1; % LED  
5 R = R1; % R  
6  
7 NETS  
8  
9 GND = D1/2 ;  
10 N00233 = D1/1 R1/2 ;  
11 VCC = R1/1 ;
```

Figura 42. Representación esquemática de un circuito sencillo acompañado de su netlist equivalente (elaboración propia).

En el esquema de la Figura 42 se observan dos componentes (color azul) interconectados desde sus pines (color rojo) con nets (color granate). Las etiquetas en azul oscuro (R1 y D1) son los designadores de referencia de los componentes, las de color negro son el nombre de las *nets* y las etiquetas de color verde identifican los pines de cada componente.

La *netlist* está dividida en dos partes. En la primera parte (encabezado *PARTS*) se definen los componentes del circuito: la resistencia con designador R1 y el LED con designador D1. En la segunda parte (encabezado *NETS*) se definen el nombre de las *nets* y los pines conectados a ellas. Tomando la línea 9 como ejemplo, en ella se define de manera unívoca que a la *net* GND únicamente está conectado el pin 2 del componente con designador D1.

Los designadores de referencia se generan de manera incremental cada vez que se introduce en el circuito un componente con el mismo designador de clase (componentes del mismo tipo). Hacer uso de esta denominación permite sin ambigüedades

A la hora de diseñar un circuito impreso, el software de edición de circuitos impresos, que es distinto del utilizado para diseñar el esquema, interpreta la topología del esquema eléctrico a partir de la *netlist*. Cuando esta se importa, el software de edición del circuito impreso carga desde una librería los *footprints* asignados a los componentes y muestra de manera visual las conexiones entre ellos (*ratsnest*).

Una vez se ha importado la *netlist* en el software de diseño del PCB, el paso siguiente es transformar esas relaciones jerárquicas en un circuito impreso con conexiones reales que atiendan a las características físicas de los componentes que se van a utilizar. Para ello se trazan pistas que interconectan los componentes haciendo uso de una o varias capas para ello.

El circuito impreso generado debe atenerse tanto a las limitaciones de la tecnología empleada para su fabricación como las impuestas por las características del producto final. Estas

limitaciones técnicas pueden ser mecánicas, eléctricas o térmicas. Existen ciertas normas al respecto reguladas por la entidad IPC para el diseño de circuitos impresos.

En algunas ocasiones en las que no es posible diseñar un circuito impreso que cumpla con las limitaciones o algún componente no se encuentra disponible, es habitual que se retroceda hasta la fase anterior para modificar algún aspecto del esquema. Por ejemplo, si se diese la circunstancia mencionada en el apartado 2.1 y, una vez realizado el diseño del circuito impreso, un elemento importante como es el integrado de gestión de energía LTC3106 no se encontrara disponible, habría que recurrir a un componente alternativo y redefinir el esquema eléctrico.

Una vez terminado el diseño del circuito impreso, se concluye con la generación de los archivos de fabricación. Estos archivos sirven para que el fabricante del circuito impreso pueda manufacturarlos con máquinas herramienta de control numérico. Estos documentos de fabricación son popularmente conocidos como *gerber* y su formato más habitual es el RS274X, o *extended gerber*, que es el estándar industrial *de facto* para la manufactura de circuitos impresos.

2.5.3 Restricciones mecánicas

La disposición de las células fotovoltaicas es un aspecto de gran importancia. Para cumplir el requerimiento de fabricar una solución integrada y cuyo montaje sea automatizable se toma la decisión de montar el módulo fotovoltaico en el propio circuito impreso. Las células fotovoltaicas se sitúan en la cara inferior (capa *Bottom*), sin que exista otro componente en la misma cara. Esa superficie se destinará a la captación de energía y tendrá que estar visible. De esta forma, todos los componentes salvo la batería estarán en la misma tarjeta. Como se ha mencionado en el apartado 2.1.5, la batería se ubicará en otro lugar por razones de temperatura.

Esta decisión hace que el diseño de la tarjeta quede acotado por las dimensiones del módulo fotovoltaico. El tamaño mínimo de la tarjeta está condicionado por la dimensión del módulo solar, tamaño que ya viene definido a su vez por la distancia a los canales de corriente o *bus-bars*. Esa área es más que suficiente para situar todos los componentes pero, sin embargo, no será posible la inclusión de componentes de tecnología THT (agujero pasante). Esto se debe a que en toda esta área el montaje de componentes se realiza por la superficie contraria al panel solar, por lo que los pines no podrán ocupar el mismo espacio que los módulos fotovoltaicos.

Además de esto, el encapsulado del módulo fotovoltaico exige un área mayor a la que ocupan las propias células fotovoltaicas; debe colocarse una lámina de ETFE sobre el módulo fotovoltaico, por lo que esta área deberá permanecer libre de obstáculos como componentes o pines.

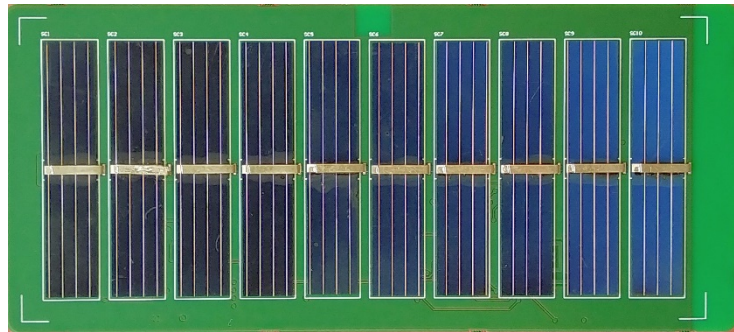


Figura 43. Configuración del módulo fotovoltaico en la parte inferior del Nodo LoRa (elaboración propia).

Por estas razones, la tarjeta de circuito impreso tiene un tamaño mayor que el módulo fotovoltaico y solo se puede utilizar una de las caras para montar componentes (Figura 43). Estos componentes tendrán que ser de montaje superficial, evitando el uso de componentes de tecnología *through-hole*. Además, la posición de las vías que interconectan unas capas con otras está limitada, de forma que no se sitúen en el mismo lugar que los *pads* de soldadura de los módulos fotovoltaicos.

Por otra parte, la inclusión de las células solares, siendo estas de un material cerámico, provoca una diferencia en la dilatación de los materiales que debe ser tomada en cuenta. El circuito impreso es un material compuesto y por lo tanto es un material anisótropo; sus propiedades mecánicas dependen de la orientación de las fibras.

El laminado utilizado en un circuito impreso de tipo FR-4 tiene la estructura que se ve en la Figura 44. Está compuesto por un núcleo formado por una o varias capas de tejido de fibra de vidrio con resina epoxi (Figura 45), que son las que aportan rigidez al circuito impreso. Este núcleo está rodeado por láminas de cobre, que actúan como conductor.

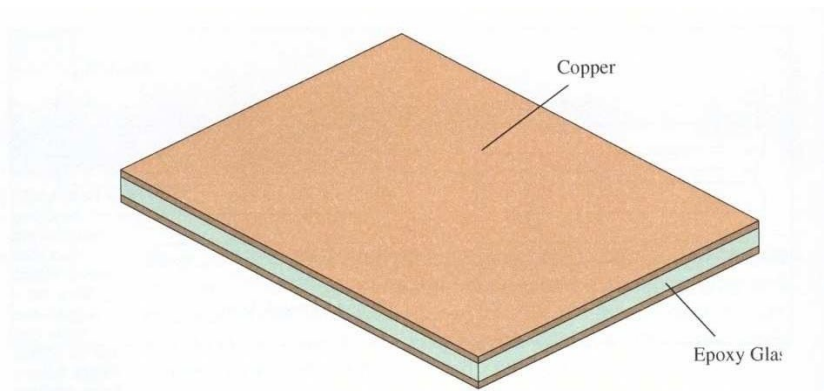


Figura 44. Estructura del laminado de un circuito impreso de dos caras (Sekalski, 2007).

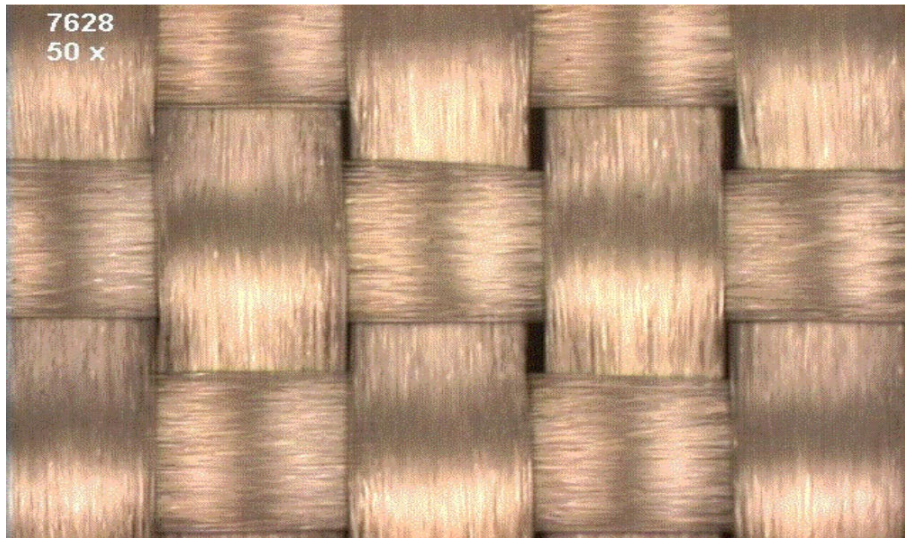


Figura 45. Tejido tafetán de fibra de vidrio 7628 utilizado en laminados para circuito impreso (Isola, 2017).

El laminado seleccionado para el circuito impreso es el Isola IS400, que tiene un coeficiente de expansión térmica en el eje Z (normal al plano) de 40 ppm/K, mientras que en la dirección de la orientación de las fibras es de 13 ppm/K (Isola, 2015). El módulo fotovoltaico se considera de silicio, con un coeficiente de expansión térmica de $\alpha_l = 3.9$ ppm/k. Esa diferencia en los coeficientes de expansión provoca tensiones cuando se impide la dilatación de alguno de los elementos. Si las tensiones son lo suficientemente grandes se pueden llegar a fracturar las células fotovoltaicas o dañar las soldaduras. Sin embargo, en el plano en el que se sitúan las células fotovoltaicas impera el comportamiento de la fibra de vidrio (Figura 44), pues el laminado está constituido por varias capas de este tejido, que tiene en el mismo plano fibras orientadas longitudinal y transversalmente (Figura 45). Por esta razón no se espera que se produzcan daños en el módulo fotovoltaico durante el periodo de vida del dispositivo. Además, puesto que las dimensiones de cada célula son pequeñas, las diferencias dimensionales que se produzcan con los cambios de temperatura también lo serán.

2.5.4 Criterios de fabricación y montaje

Una de las primeras cuestiones que cabe plantearse es qué tipo de circuito impreso es necesario. La alta densidad de integración y la existencia de antenas exigen utilizar un circuito multicapa.

Fundamentalmente existen cuatro tipos de sustrato para circuitos impresos: aluminio, papel fenólico, laminado de fibra de vidrio y laminados de PTFE o Rogers. Cada uno tiene unas aplicaciones específicas; el laminado de papel fenólico y el aluminio únicamente soportan trazado de pistas en una cara, por lo que no son buenas elecciones. El laminado de fibra de vidrio y resina epoxi es el más extendido, es válido para multitud de aplicaciones y soporta la fabricación de circuitos multicapa complejos. El laminado de PTFE es el más costoso de los cuatro y únicamente se utiliza para circuitos que trabajan a altas frecuencias, pero no soporta un número de capas tan elevado como el anterior.

De ellos únicamente es válido para el proyecto el sustrato de fibra de vidrio con resina epoxi en su versión más habitual, el FR-4, ya que el uso que se le va a dar es bastante genérico. Aunque existen líneas de transmisión en el circuito impreso, estas no son de alta frecuencia y no se

necesita recurrir a un laminado de PTFE. En cuando al número de capas, no es posible utilizar 2 y debe hacerse en cuatro capas, pues el diseño tiene cierta densidad de integración.

De igual manera, debe definirse el espesor de las pistas de cobre. La industria de los circuitos impresos utiliza medidas imperiales y este caso no es una excepción. El grosor hace referencia a la cantidad de cobre depositada en onzas por pulgada cuadrada ($\frac{oz}{in^2}$). No hay razón para no utilizar valores habituales por lo que se selecciona 1 oz por cada pulgada cuadrada, que en el sistema métrico equivale a 35 μm de espesor.

Para la fabricación del circuito impreso también debe definirse el acabado superficial de los *pads* de soldadura. El fabricante recubre los *pads* con un metal más resistente a la corrosión que el cobre para evitar que la pátina que se generaría en el cobre dificulte el proceso de soldadura. Existen varios acabados, pero el más adecuado es el acabado de los *pads* en oro (ENIG).

Otros parámetros que deben considerarse tienen relación con las capacidades de fabricación de la empresa. Consultando al fabricante los parámetros de mínima anchura de pista y mínimo orificio que puede realizar (Eurocircuits). Estas son normas de diseño que se introducen en el software para que nunca se incurra en el error de incumplirlas. Una vez el diseño se termina, se realiza una comprobación de las normas de diseño (*Design Rule Check*). En esta comprobación el software de diseño verifica que no se ha violado ninguna de estas reglas.

Tras esta evaluación, los parámetros de fabricación quedan definidos de la siguiente manera:

- Sustrato del circuito impreso: **FR4**
- Número de capas: **4**
- Espesor del cobre: **1 oz** (35 μm)
- Acabado superficial: **ENIG**
- Anchura de pista mínima: **6 mil** (0.15 mm)
- Tamaño de orificio mínimo: **10 mil** (0,25 mm)

Se selecciona el laminado FR-4 Isola IS400 con dieléctrico 7628, que es el que la empresa utiliza para fabricación de prototipos. En la Figura 46 se muestra el *Stack-Up definido* para el circuito impreso. Las caras superior e inferior se utilizan para trazado de pistas, mientras que las caras interiores L2 y L3 se usan para planos de tensión y masa respectivamente.

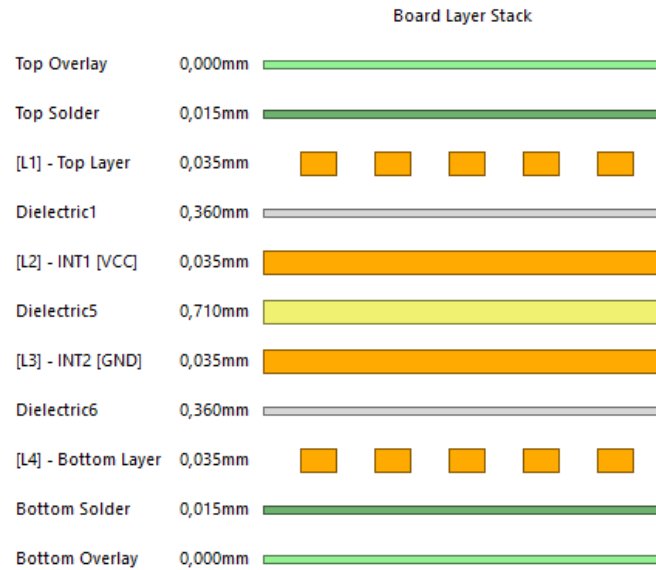


Figura 46. Stack-Up del circuito impreso fabricado (elaboración propia).

2.5.5 Consideraciones de Diseño Para Test (DFT)

Además de los puntos de test para la línea UART mencionados en el apartado 2.1.3, también se introducen puntos de test para medir magnitudes importantes como las tensiones de la tarjeta. La inclusión de estos *test points* permite diseñar procedimientos de test para probar las tarjetas de manera automática una vez hayan sido montadas en fábrica.

En el proceso de test conocido como ICT la tarjeta se inserta sobre una cama de agujas que hacen contacto con los *test points*. Mediante el uso de un equipo especial estas agujas alimentan la tarjeta y miden las tensiones para comprobar que el funcionamiento es correcto.

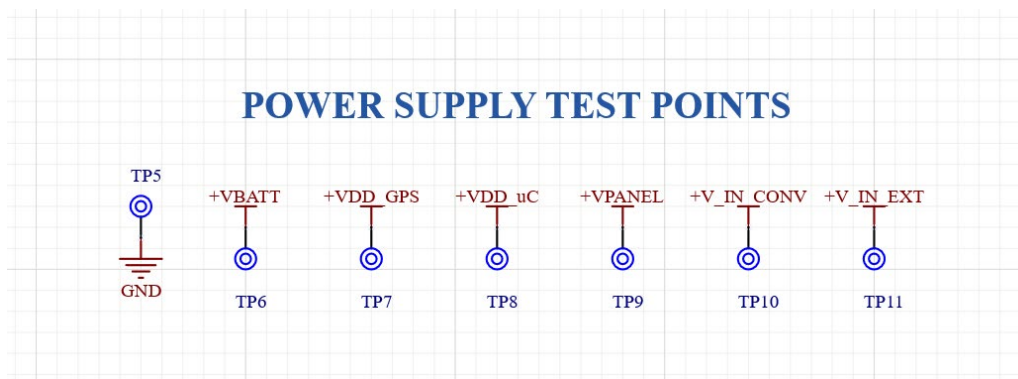


Figura 47. Puntos de test para facilitar la medida de las tensiones principales de la tarjeta (Elaboración propia).

2.5.6 Disposición de los componentes (layout)

Como se comenta en sección anterior, a la hora de ubicar los componentes en la tarjeta se parte de una tarjeta con el modulo solar en la cara inferior, que no podrá estar ocupada. Sin embargo, sí que se dispone de libertad para ubicar componentes en la cara superior.

Tras analizar varias alternativas se selecciona la disposición de componentes que se muestra en la Figura 48.

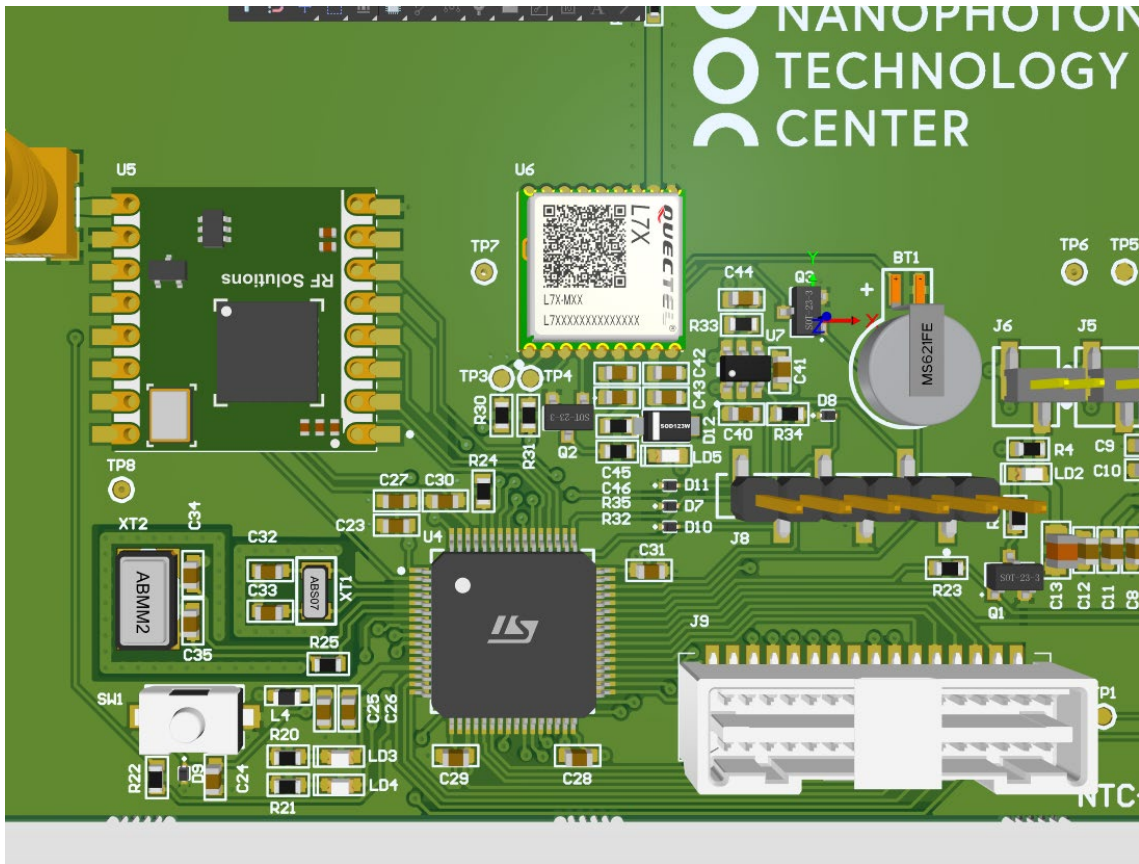


Figura 48. Disposición de los principales componentes de la tarjeta en la cara superior (Elaboración propia).

2.5.7 Particularidades del diseño

Existen ciertas particularidades que hacen el diseño del nodo LoRa singular. A continuación se detallan los más relevantes.

Diseño de convertidores de tensión

Como es un elemento que trabaja a alta frecuencia el fabricante recomienda una disposición de los componentes concreta, sin que existan aristas o cambios de sección que puedan suponer un cambio de impedancias importante. Se han seguido las recomendaciones de la hoja de datos en todo momento, aunque seleccionando componentes auxiliares de mayor tamaño para facilitar su soldadura manual si fuera necesaria.

En las siguientes imágenes se muestra el diseño del circuito impreso. Se ha evitado conectar la línea de masa del convertidor al resto del circuito directamente. Esta conexión se ha hecho a través de vías, aprovechando que las vías presentan cierta inductancia que dificulta el paso de las altas frecuencias producidas por el convertidor a las siguientes capas. La masa se conecta al circuito en la tercera capa (Figura 51) por el mismo punto que entra y sale la corriente al convertidor en la cuarta capa, siguiendo el método recomendado (ELE Times, 2019).

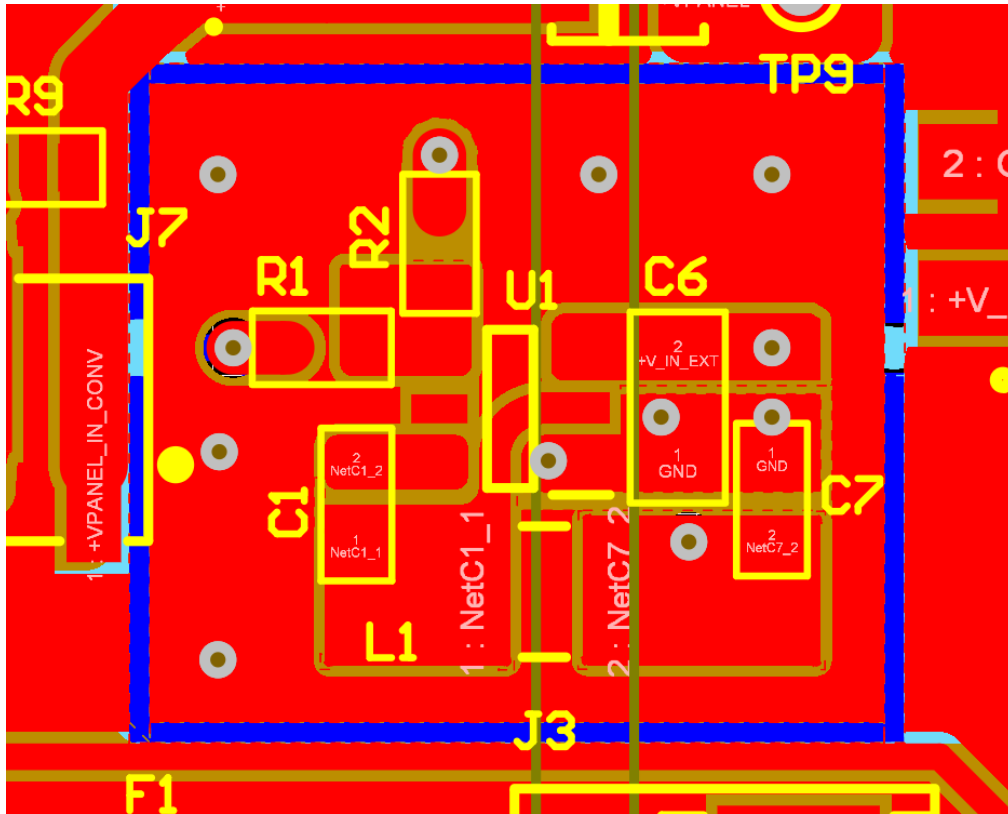


Figura 49. Detalle del convertidor de tensión en la capa 1 del circuito impreso, TOP (Elaboración propia).

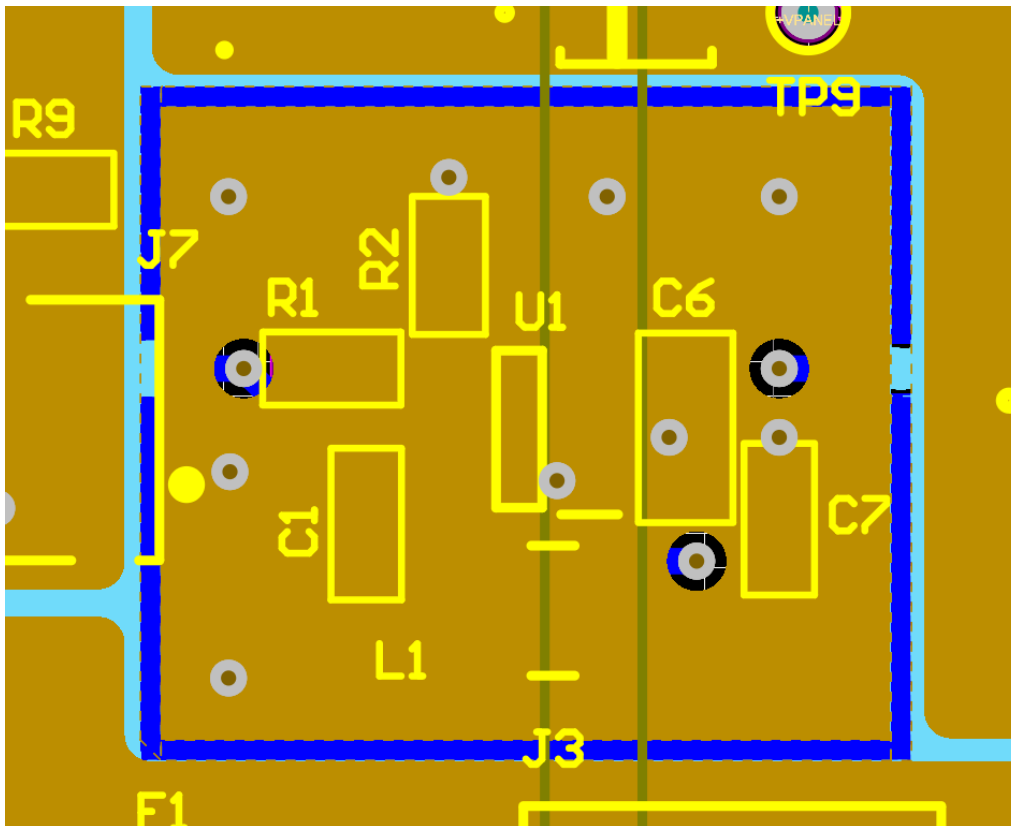


Figura 50. Detalle del convertidor de tensión en la capa 2 del circuito impreso, INT1 [VCC] (Elaboración propia).

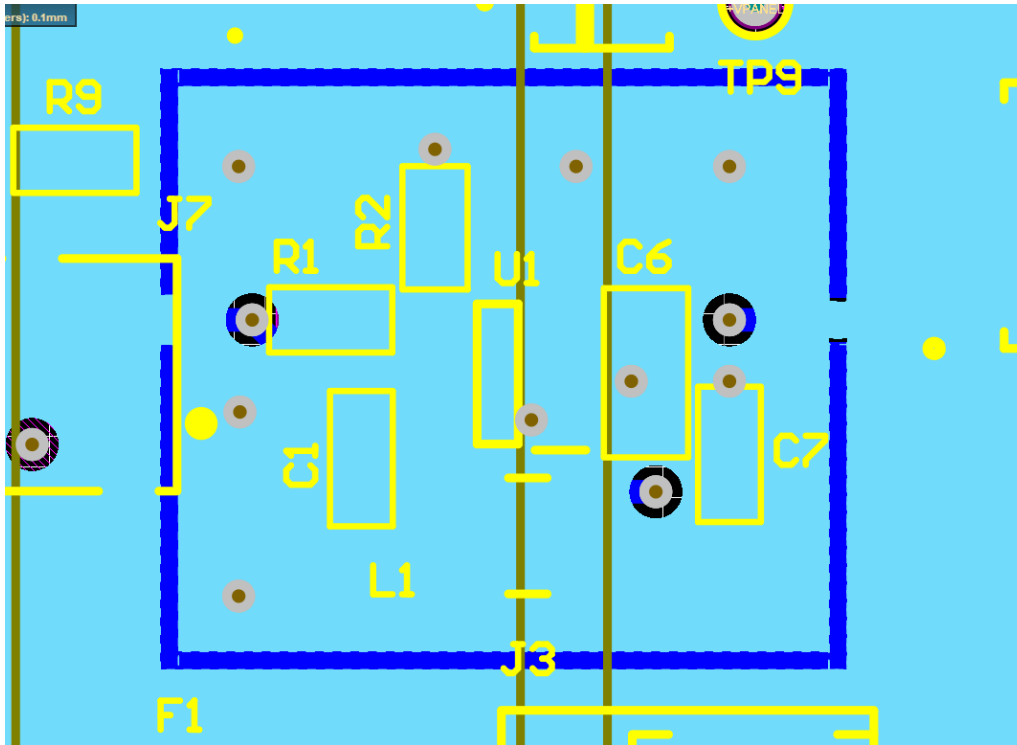


Figura 51. Detalle del convertidor de tensión en la capa 3 del circuito impreso, INT2 [GND] (Elaboración propia).

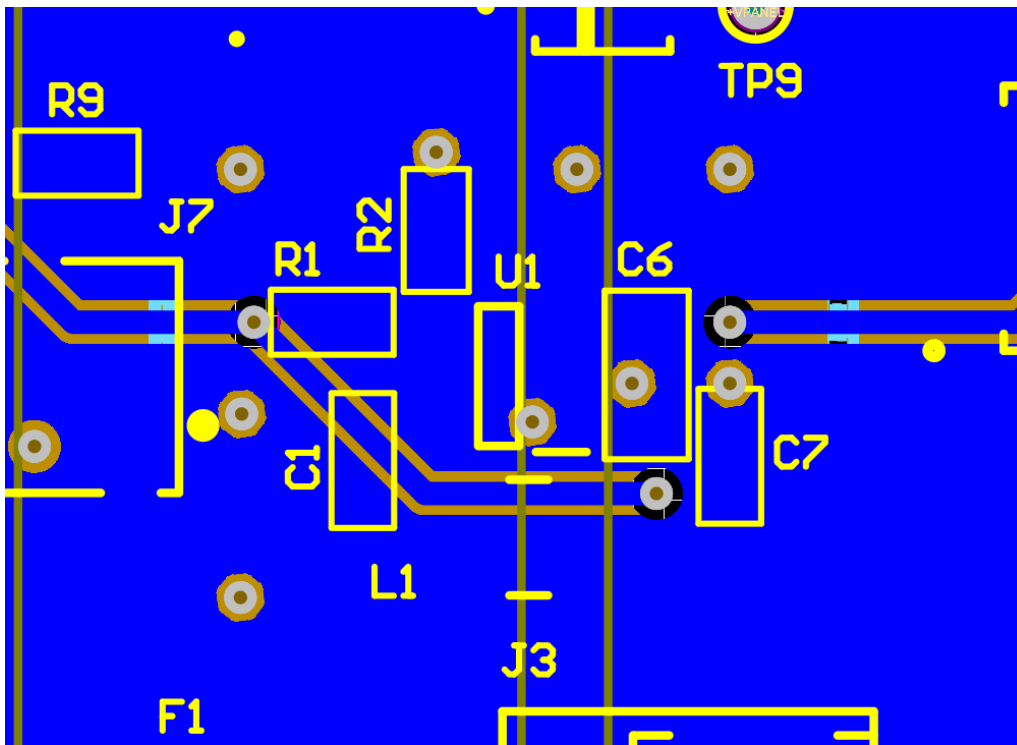


Figura 52. Detalle del convertidor de tensión en la capa 4 del circuito impreso, [Bottom] (Elaboración propia).

Conectores de expansión

Se selecciona un conector de Molex de la serie 504187. Este conector tiene como ventaja la gran densidad de pines y que la altura cuando se encuentran dos conectores conectados es de unos 8 mm, lo que permite que ciertos componentes con altura puedan coexistir con una tarjeta de expansión.

Para evitar tener que utilizar elementos específicos de fijación, ya que no es posible agujerear la zona de la tarjeta de expansión, se añade un segundo conector (Figura 54). Este segundo conector ayuda a la sujeción de la tarjeta, pero también sirve para alimentar con distintas tensiones a una futura tarjeta de expansión.

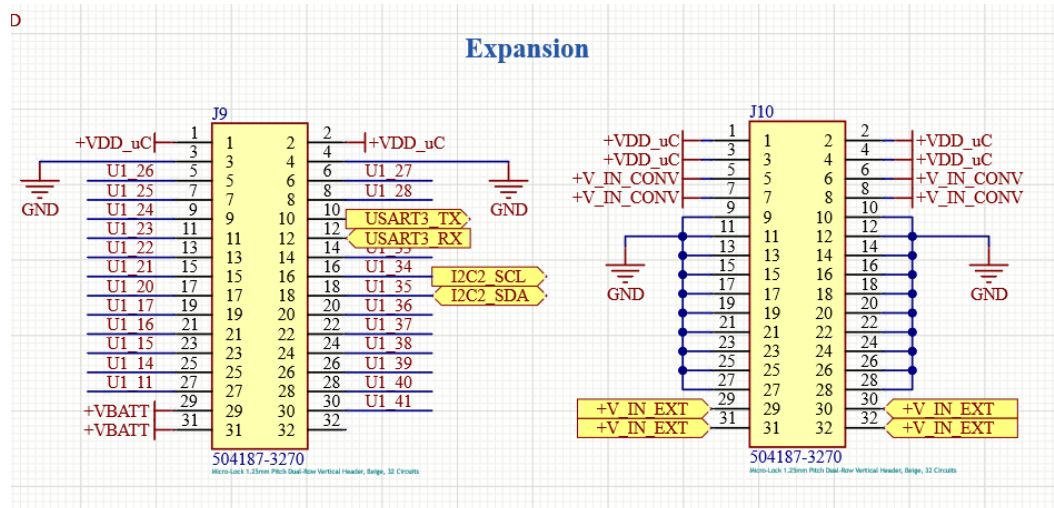


Figura 53. Conexiones del conector de expansión de datos J9 y de energía J10 (Elaboración propia).

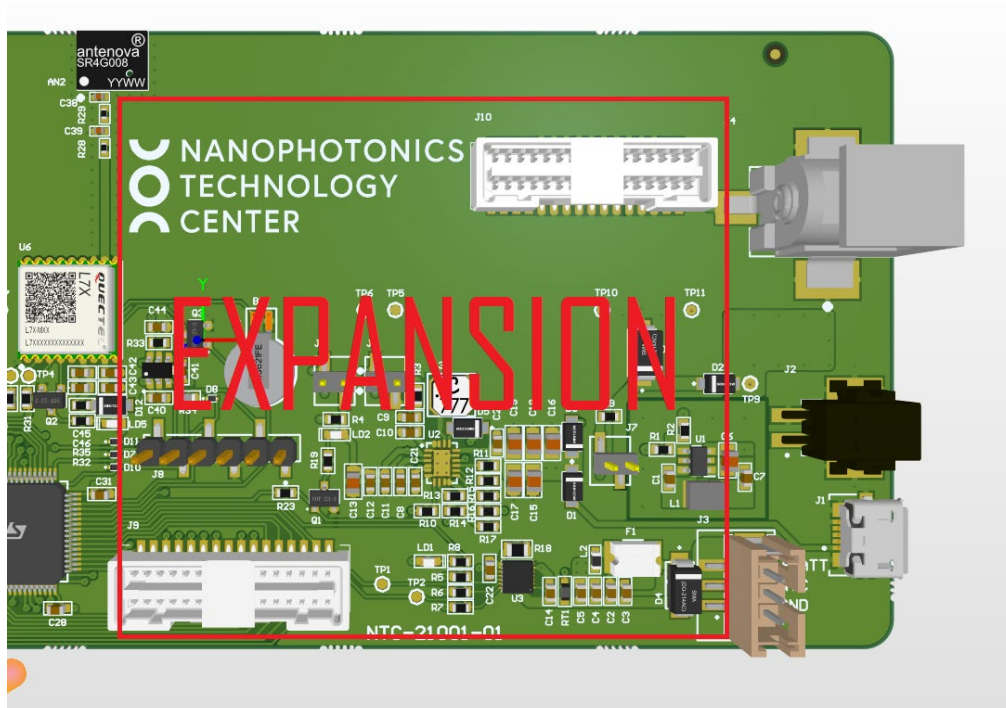


Figura 54. Espacio reservado para una tarjeta de expansión (Elaboración propia).

Trazado de pistas del microcontrolador

El orden de trazado de las pistas resulta crucial ya que puede marcar la diferencia entre un diseño donde el uso del circuito impreso sea eficiente o no. Realizar un buen posicionamiento de los componentes simplifica en gran medida el trazado de las pistas. Esto es algo a tener en cuenta en la zona en la que se sitúa el microcontrolador, ya que la densidad de conexiones es la más alta de la tarjeta. La existencia de conectores de expansión dificulta en mayor medida esta tarea, por eso se sitúa en un lugar en el que sus interconexiones no interfieran con las de otros sistemas. El orden a seguir para el trazado de las pistas es el mismo que se menciona en el apartado 2.1.1.

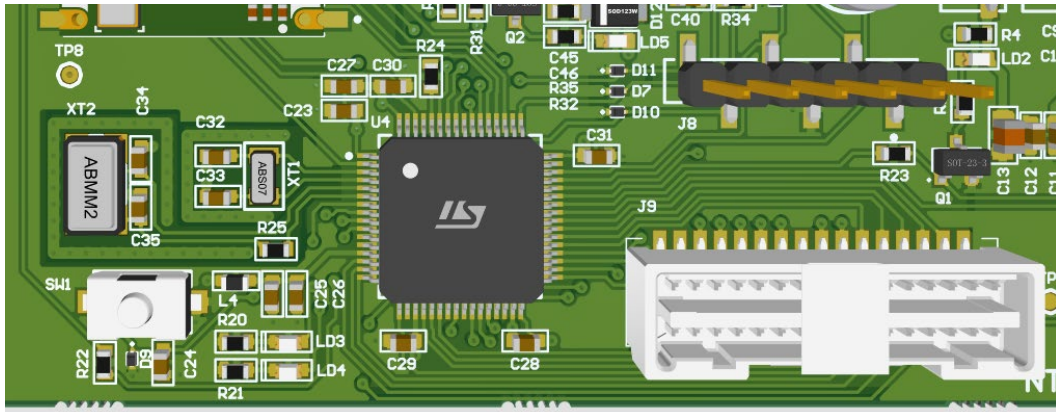


Figura 55. Detalle del trazado de las pistas en las cercanías del microcontrolador (elaboración propia)

Conexión de la antena y adaptación de impedancias

Para el sistema de radiocomunicaciones se opta por permitir tanto el uso de una antena interna, embebida en el PCB, como una externa que pueda conectarse a través de un conector y ubicarse en un lugar distinto al de la tarjeta.

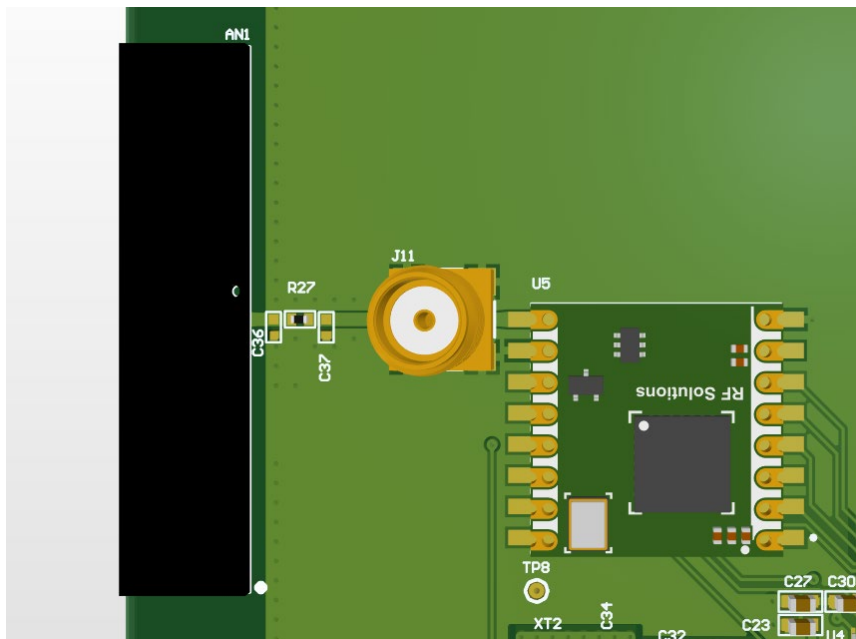


Figura 56. Representación en 3D del módulo de comunicaciones RFM95W con guía de onda que une una antena en el circuito impreso y un conector SMA para antena externa (elaboración propia).

La transmisión en condiciones óptimas de la señal de radiofrecuencia desde el módulo de comunicaciones hasta la antena requiere el uso de una línea de transmisión. Para simplificar la adaptación de impedancias se requiere que dicha línea de transmisión tenga la misma impedancia característica que la antena y el módulo de radio.

La impedancia de salida del módulo RFM95W es de 50Ω (HopeRF, 2013). Se selecciona una antena integrada con una impedancia de entrada de 50Ω para que no sea necesaria la adaptación de impedancias. Además de una antena compacta también se añade un *footprint* para un conector SMA de 50Ω que permita conectar una antena externa mediante un cable coaxial (Figura 56). La línea de transmisión que interconecte el módulo de comunicaciones con las antenas también deberá tener la misma impedancia característica.

Existen varias tecnologías de guías de onda compatibles con la fabricación en el circuito impreso. Algunas de las más utilizadas son la tecnología *microstrip* y la guía de onda coplanar.

La guía de onda coplanar con masa tiene ciertas ventajas respecto al *microstrip*; tiene unas pérdidas menores y menor dependencia de la frecuencia de la señal transmitida (C. Wadell, 1991). En el diseño de una guía de onda coplanar con masa influyen cinco factores: anchura de la pista (a); espaciado entre pista y plano de masa adyacente ($G = (b-a)/2$); espaciado entre pista y plano de masa sobre el que discurre la pista (h); espesor de conductor (t) y constante dieléctrica o permitividad relativa del material (ϵ_r).

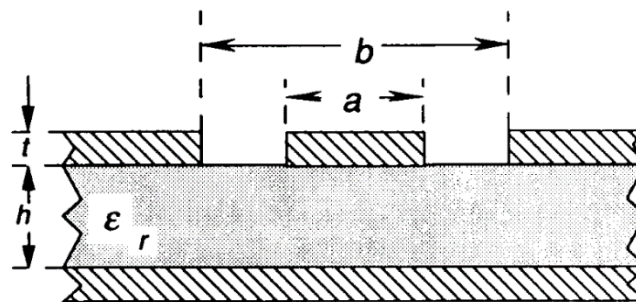


Figura 57. Guía de onda coplanar con plano de masa (C. Wadell, 1991).

En el caso del presente proyecto la constante dieléctrica o permitividad relativa ϵ_r del material viene determinada por la naturaleza del dieléctrico que forma el laminado. El valor de esta característica es conocido, depende del tipo de laminado concreto y suele ser suministrado por el fabricante. El laminado Isola IS400 con dieléctrico 7628 tiene una constante dieléctrica relativa de 4 @ 100 MHz y 3.9 @ 500 Mhz. Este último será el valor que se tome para los cálculos, pues la permitividad no suele variar en gran medida por debajo de la frecuencia de 2 GHz.

La distancia entre la pista conductora y el plano de masa inferior (h) vendrá determinado por el *Stack-up* del circuito impreso (Figura 57). Para una tecnología de fabricación a 4 capas con FR-4 tiene un valor de 0,36 mm + 0,71 mm. En cuanto al espesor del conductor correspondiente a 1 oz/in² de cobre (t), el valor es de 0.035 mm.

Siendo los anteriores parámetros fijos, para diseñar una guía de onda con impedancia característica Z_0 los únicos parámetros con margen de variación son la anchura de la pista (a) y la distancia de separación del plano de masa (b). Existen infinitas combinaciones de ellos que resultan en una guía de onda con impedancia característica de 50Ω , fijando el valor de la

anchura de la pista (a) se calcula el resultado de b en el apartado E.4 del anexo de cálculo. El valor de la anchura de la pista se ha fijado en 0.86mm, pues es un valor muy parecido a la anchura del *pad* de los componentes de formato EIA 0402 (Figura 58).

Debe asegurarse el retorno de corriente por el plano de masa. Por esa razón se distribuyen vías a lo largo del contorno del plano de masa en la cercanía con la pista conductora (Figura 58), esta es una técnica conocida como *via stitching*.

La posición del conector SMA para una antena externa también es un factor a tener en cuenta, ya que si se deja libre un extremo de la línea de transmisión esta actuaría como un *stub* y alteraría la impedancia característica del circuito. Esto ocasionaría una desadaptación de impedancias y la aparición de onda estacionaria por lo que debe evitarse. Por ello, para poder aproximar la antena externa todo lo posible al módulo de radio, se añade una resistencia de 0 Ohm que actúe a modo de selector. De esta forma la sección de línea de transmisión que conecta a la antena compacta puede desconectarse eliminando la resistencia cuando en lugar de dicha antena se utilice una antena externa. La resistencia que se ha implementado con ese fin tiene el designador de referencia R26 (Figura 58) y se encuentra situada justo debajo del conector SMA J11, de forma que el montaje de ambos componentes es excluyente.

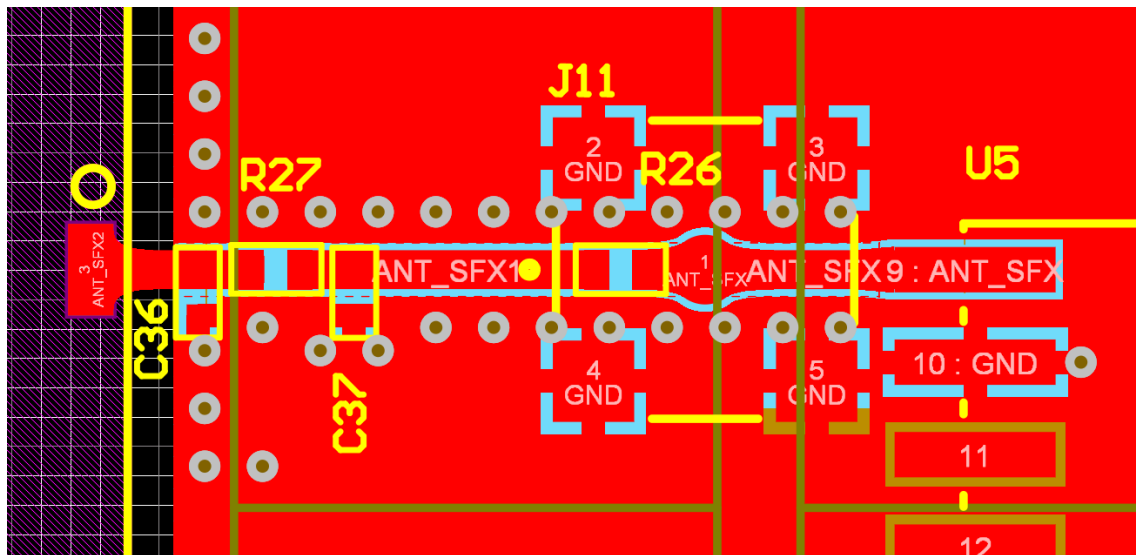


Figura 58. Guía de onda coplanar que une el módulo de comunicaciones RFM95W con las antenas (Elaboración propia).

A la hora de calcular las dimensiones de la guía de onda del sistema de geoposicionamiento, el procedimiento se hace de la misma manera. La anchura de la pista se mantiene igual ($a = 0,86$ mm), el único parámetro que cambia es la frecuencia utilizada, que es algo mayor (1575 Hz). Con estos datos la distancia entre la pista y el plano adyacente es de 0.1447 mm (cálculos realizados en el apartado E.4 del anexo de cálculo).

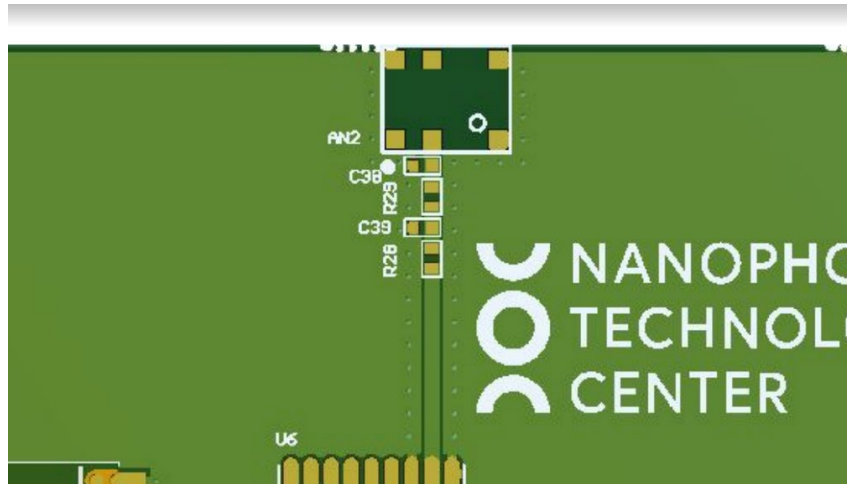


Figura 59. Guía de onda y antena del sistema de geoposicionamiento (Elaboración propia).

2.6 Montaje de la tarjeta

En los anexos de este proyecto pueden encontrarse los esquemas eléctricos y la lista de materiales (BOM) de la tarjeta completa, pero el montaje se realiza conforme a la variante PROTO_NO_GPS, en cuya lista de montaje se excluyen los componentes relacionados con el sistema de geoposicionamiento.

Todos los componentes relacionados con el sistema de geolocalización (Plano 3 del anexo de planos) no ha sido montado por no considerarse un sistema necesario para la aplicación de luminaria inteligente. Los componentes de este sistema podrán montarse en el futuro si se desea dotar a la tarjeta de la funcionalidad que aporta el GPS.

La tarjeta podrá estar sometida a inclemencias meteorológicas a pesar de encontrarse dentro de un cerramiento. En el rango de temperaturas para el que se diseña podrá existir condensación o podrá estar expuesta al polvo.

De por sí, un circuito impreso es relativamente resistente tanto mecánicamente como químicamente, sin embargo, esta resistencia puede aumentarse para permitir que el dispositivo se encuentre en entornos hostiles sin comprometer la fiabilidad del mismo. Para ello se realiza un proceso de tropicalización. La tropicalización o *coating* evita que la suciedad o la humedad se depositen directamente sobre la tarjeta o sus elementos mediante la deposición de una película de un material plástico.

Existen varios materiales aptos para tropicalizar una tarjeta. Estos materiales van desde aplicación de barnices específicos hasta materiales más complejos como para-Xilenos. Los materiales más empleados habitualmente son barnices acrílicos, resina epoxi, poliuretano o la silicona cuando se requiere encapsular todo el circuito (*potting*). Las características de los materiales aptos para tropicalizado suelen regularse según la especificación MIL-I-46058 y la norma NASA-STD-8739.1.

Cuando se toma la decisión de aplicar *coating* a un circuito impreso debe tenerse en cuenta cómo va a afectar a la reparabilidad, ya que la tarjeta resulta muy difícil de reparar o modificar si se selecciona un método de tropicalizado incorrecto.

2.7 Resultado final

A continuación, se presentan algunas imágenes de las tarjetas Nodo LoRa fabricadas en la empresa externa ELATE S.A.

Como puede apreciarse, la tarjeta ha sido fabricada pero no tiene montados todos los componentes. Además de los componentes no montados del sistema de geoposicionamiento, que han sido excluidos de manera deliberada, un pequeño número de componentes no ha podido ser montado por no encontrarse disponible. Estos componentes se encontraban disponibles a través de múltiples proveedores en el inicio del proyecto, pero en el intervalo de tiempo en el que se completó el diseño y se encargó su fabricación dejaron de estarlo. Para algunos ha sido posible encontrar un reemplazo o realizar un retrabajo que permita utilizar un componente alternativo con otro factor de forma, sin embargo, otros elementos como el microcontrolador han resultado imposibles de reemplazar y debe esperarse a que vuelva a haber existencias.

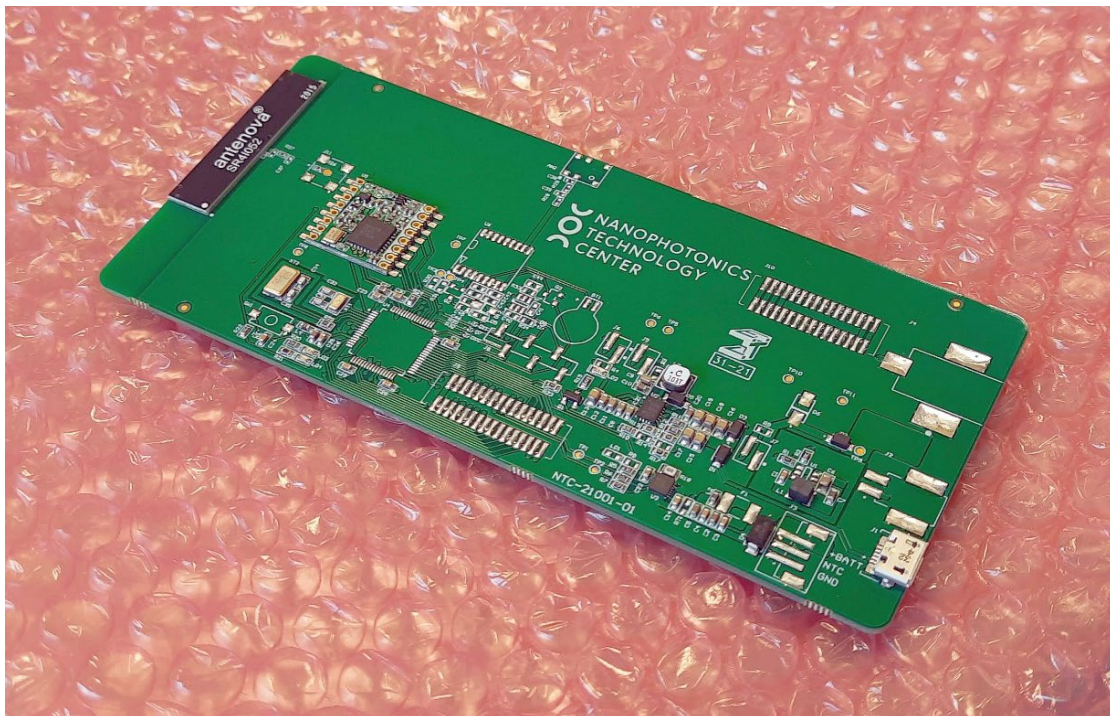


Figura 60. Vista alternativa de la tarjeta Nodo LoRa desarrollada a lo largo del proyecto (elaboración propia).

Puesto que la tarjeta no ha sido completamente ensamblada, todavía no se encuentra en situación completamente funcional. Las pruebas de aplicación se hacen utilizando el kit de desarrollo Nucleo-64 y con el resto de subsistemas de la tarjeta Nodo LoRa compuesto por elementos discretos externos a la tarjeta de desarrollo.

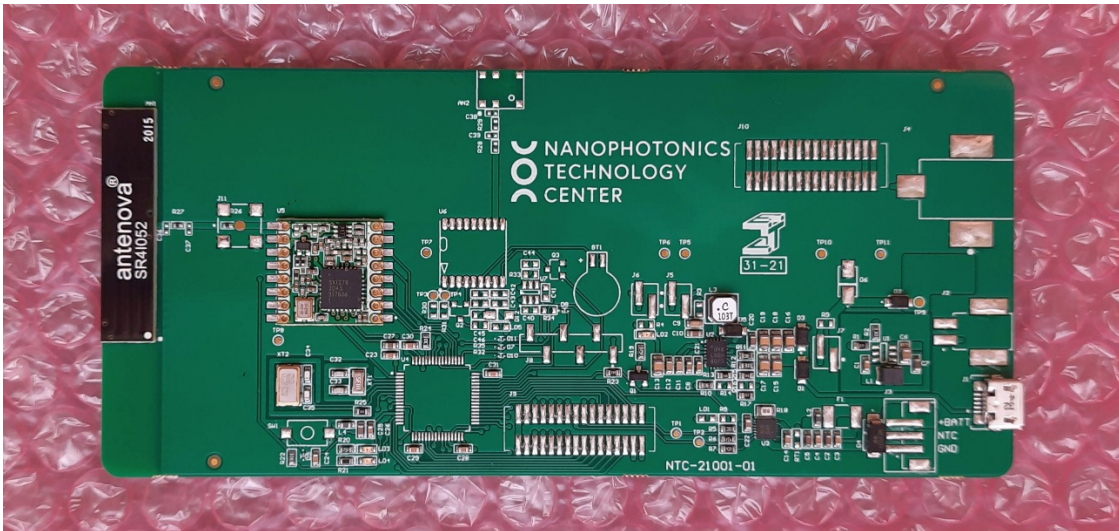


Figura 61. Cara superior de la tarjeta Nodo LoRa (elaboración propia).

No se han montado los conectores y piezas plásticas porque no soportarían el ciclo de *reflow* adicional que se requiere realizar para montar los módulos fotovoltaicos.

Los módulos fotovoltaicos se sitúan en la otra cara de la tarjeta (Figura 43), tras esto se montan los conectores en la tarjeta de manera manual.

2.8 Pruebas en cámara climática

Tal y como se ha expuesto en el apartado 2.5.3, si el dispositivo se encuentra situado en el exterior se encontrará expuesto a los ciclos de temperatura provocados por la noche y el día. Al producirse continuamente a lo largo del tiempo, estos ciclos pueden llegar a producir fatiga térmica en algunas zonas de la tarjeta debido a la desigual dilatación de los materiales. La integración de las células fotovoltaicas acentúa este problema, pues la exposición a la luz solar hará que la temperatura del dispositivo suba por encima de la temperatura ambiente. Además, las células fotovoltaicas son elementos cerámicos de gran tamaño relativo con distinto coeficiente de dilatación y, por tanto, susceptibles a la fractura.

Esta misma problemática se da con los módulos fotovoltaicos comerciales, por ello el estándar IEC 61215 define una secuencia de test en la que se someten los módulos fotovoltaicos a 200 ciclos térmicos en el rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cada ciclo debe tener una tasa de variación máxima de temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, permanecer estable en la zona de máxima y mínima temperatura durante al menos 10 minutos y tener una duración máxima de 6 h. Mientras se realiza el ciclo debe inyectarse en las células fotovoltaicas la corriente de máxima potencia cuando la temperatura es superior a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta prueba de envejecimiento equivale a la fatiga sufrida por el módulo tras un tiempo de vida de 10 años en condiciones normales de intemperie.

Se realizan pruebas sometiendo la tarjeta desarrollada a distinto número de ciclos térmicos, obteniéndose la gráfica mostrada en la Figura 26, en la que no se aprecian variaciones de corriente ni tensión tras distintas series de ciclos térmicos. Con estos datos se concluye que el dispositivo no sufre daños por fatiga térmica y podrá soportar las condiciones de intemperie a las que esté expuesto durante su vida útil.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

3.1 Fabricación de la maqueta de pruebas

Para probar la aplicación del sistema desarrollado a lo largo del proyecto y demostrar el concepto de luminaria inteligente se construye una maqueta que implemente los elementos típicos que tendría una luminaria como la mencionada en el apartado 1.4.

Esta maqueta se fabrica con el objetivo de realizar una prueba conceptual de los sistemas y no para iluminar, ya que el funcionamiento de la tecnología LED ya ha quedado demostrado y se lleva utilizando durante un tiempo en alumbrado de interiores y exteriores. El objetivo es, por tanto, probar las tecnologías empleadas en la tarjeta Nodo LoRa y la interoperabilidad de sus sistemas para su implementación en una luminaria.

Si la idea de aplicación resulta interesante en el futuro correspondería desarrollar un prototipo más avanzado de luminaria se asimile más a una versión comercial.

3.1.1 Concepto

Este sistema permite el telemando de una luminaria de pruebas. A pesar de que la potencia de la luminaria es muy reducida para que su funcionamiento en un entorno de laboratorio no sea molesto, su operación es exportable a cualquier tipo de luminaria y no existe ninguna diferencia en su operación.

La luminaria se configura como un nodo de la red que puede funcionar de manera autónoma o gestionarse a distancia en función de los parámetros recibidos desde un servidor. Se puede encender o apagar y cargar una batería en el momento que interese, ya sea utilizando células fotovoltaicas o alimentación externa como fuente de energía. También envía al servidor datos obtenidos de algunos sensores e información acerca del estado de la batería.

Todos los elementos de la maqueta se fijan sobre un bastidor de aluminio, de forma que todo el sistema pueda moverse o reubicarse de manera fácil.

3.1.2 Descripción del sistema

La maqueta está formada por los siguientes elementos:

Fuente de alimentación externa PS1: Es una fuente de alimentación que convierte 230 V CA en 12 V CC. Se utiliza para alimentar la lógica del sistema y cargar la batería.

Fuente de alimentación externa PS2: Es una fuente de alimentación que convierte 230 V CA en 20 V CC. Se utiliza para alimentar la luminaria.

BT1: Batería de ion de Litio en formato 18650.

A1: Se trata de una tarjeta de desarrollo Nucelo-L452RE, que incorpora un microcontrolador STM32L452. Esta tarjeta es la que gestiona el sistema. Se conecta al módulo de sensores y comunicaciones A6.

A2: Es la tarjeta reguladora de tensión. Suministra 5V para la tarjeta A1 y carga de batería a partir de la fuente de alimentación externa PS1.

A3: Tarjeta de interconexiones: Esta tarjeta recibe las señales de control de encendido o apagado de la luminaria y carga de batería, que actúan sobre unos transistores que conmutan las tensiones de alimentación de la luminaria (20 V) y carga de la batería (5 V).

A4: Luminaria compuesta por 8 LED de color blanco conectados en serie. Se trata de una solución comercial que ha sido modificada para adecuarla a las condiciones de laboratorio.

A5: Módulo fotovoltaico compuesto por 10 células fotovoltaicas. Se utiliza para alimentar la tarjeta A1 y cargar la batería.

A6: Placa de prototipos que incorpora el módulo LoRa RFM95 y el sensor de temperatura y humedad DHT11.

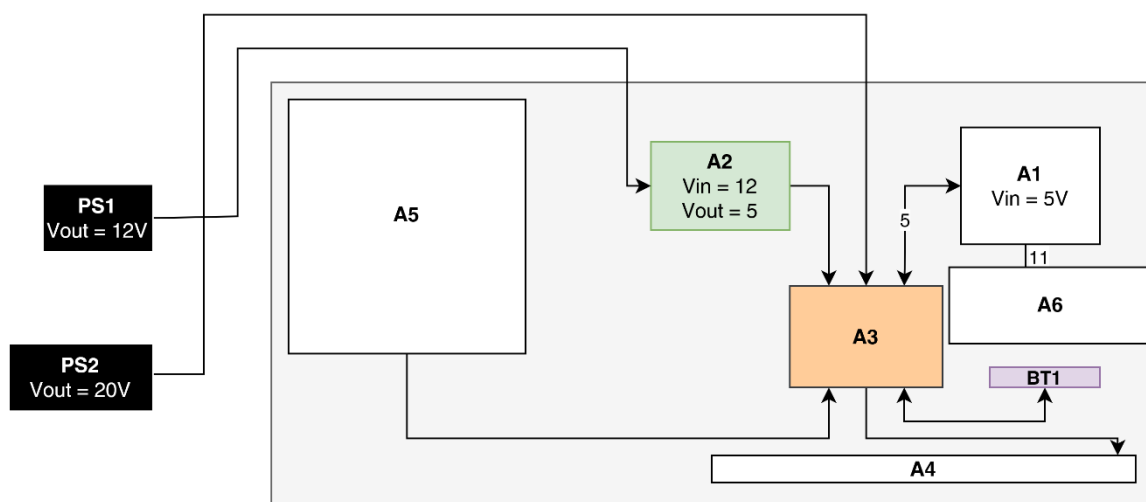


Figura 62. Diagrama de posicionamiento de los elementos de la maqueta del nodo luminaria (Elaboración propia).

3.1.3 Funcionamiento

La tarjeta A1 incorpora la inteligencia del sistema y es la que gestiona su comportamiento. Se comunica con el servidor a través de un módulo RFM95 situado en A6 que proporciona conectividad LoRa. En función de los parámetros de funcionamiento, ya sean pre-programados o recibidos desde el servidor, envía señales de control a la tarjeta A3 para encendido de la luminaria o carga de la batería. Esta tarjeta también vigila la tensión de la batería para evitar cargarla más de lo recomendable. Periódicamente comunica la temperatura, humedad ambiente y tensión de la batería.

Los parámetros de funcionamiento de la luminaria se modifican a través de la radio LoRa. Un servidor con sistema de radiocomunicaciones LoRa ubicado en otro lugar envía los parámetros de funcionamiento y la luminaria los recibe. Los datos de funcionamiento se introducen en el servidor por medio de puerto de serie y este los envía cuando recibe una petición desde el nodo luminaria, que actúa como cliente.

La tarjeta A3 interconecta todos los sistemas de la luminaria. Recibe las señales de control de la tarjeta A1, conmutando la alimentación de PS1 (20 V) para encender o apagar la luminaria A4 y

permitiendo o impidiendo el paso de corriente para la carga de la batería BT1. En el anexo de planos se muestra su esquema eléctrico.

La carga de la batería BT1 se realiza en función de una señal de control, utilizando una pareja de transistores. La batería puede cargarse desde la alimentación de 5 V (A2) o el panel fotovoltaico (A5) y suministra corriente a la carga cuando no existe otra fuente de energía disponible.

3.2 Implementación del firmware en el nodo

El programa en C que se implementa en el nodo luminaria realiza las funciones comentadas en este apartado e ilustradas en el diagrama de flujo de la

Figura 63.

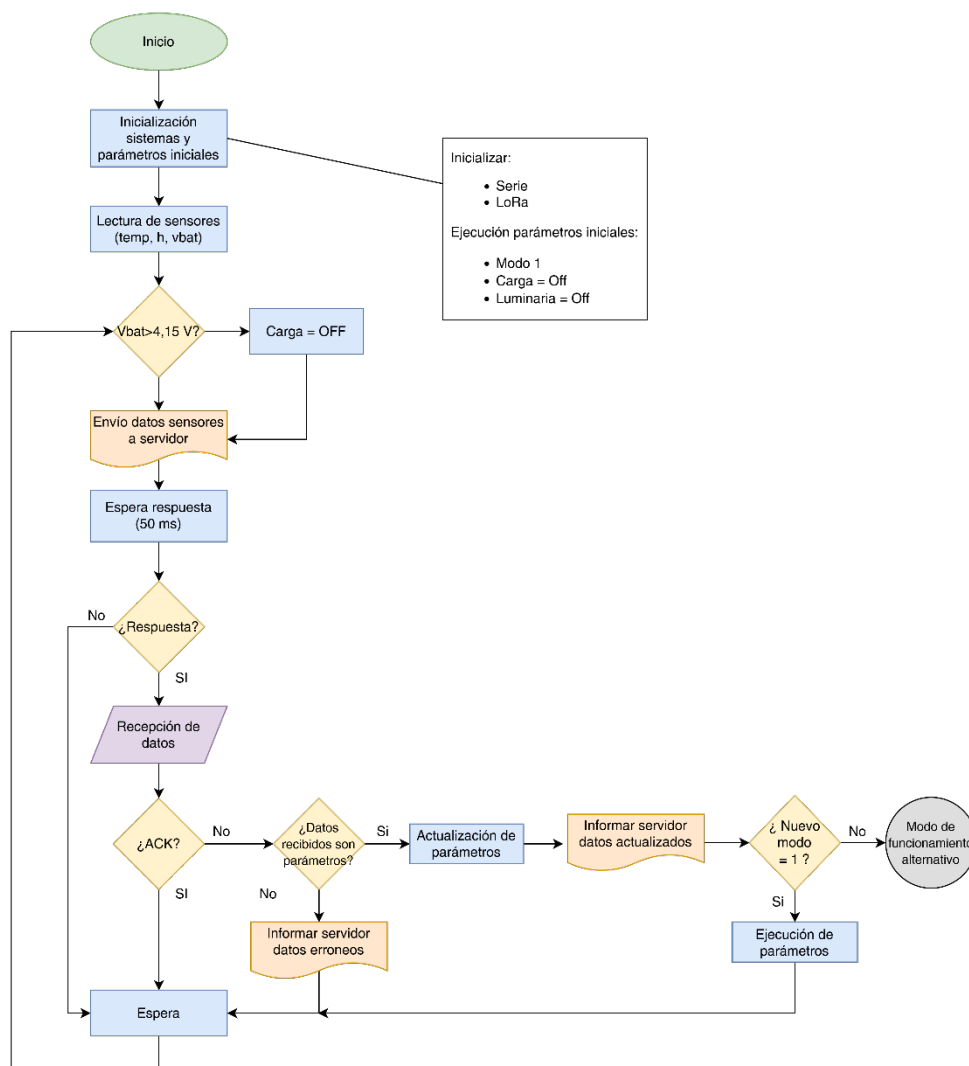


Figura 63. Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo luminaria (Elaboración propia).

El funcionamiento puede resumirse de la siguiente manera:

El nodo cuenta con unos parámetros de funcionamiento predefinidos. Por defecto se encuentra con la señal de control de la luminaria en nivel bajo con la carga de la batería desactivada.

El nodo envía de manera periódica datos de los sensores de temperatura, humedad y tensión de la batería. Tras el envío permanece a la escucha durante un corto periodo de tiempo esperando confirmación de que se han recibido los datos (ACK) o la modificación de los parámetros de funcionamiento. El tiempo entre comunicaciones viene definido por el intervalo de balizamiento (variable *bcnintvl*). Una vez recibe los nuevos parámetros de funcionamiento, el nodo lo comunica al servidor mediante el mensaje *Status 1*. Si los parámetros recibidos son erróneos el nodo envía al servidor el mensaje *Error 1*, para que el operador que se encuentra monitorizando el servidor tenga constancia y pueda reintroducir los valores de nuevo.

3.3 Implementación del firmware en el servidor

El *firmware* del servidor es algo más sencillo. Su misión es permanecer a la escucha y recibir los datos de los sensores del nodo. Una vez recibe un mensaje dispone de una ventana de tiempo para responder al nodo, que permanecerá a la escucha durante un corto periodo de tiempo.

Si el servidor recibe datos del nodo, confirma que los ha recibido para que el segundo sepa que el servidor se encuentra en el rango de cobertura. Si un usuario conectado al servidor LoRa quiere cambiar los parámetros del nodo luminaria, tiene que introducir una trama de números con un formato determinado.

En esta trama de números la primera cifra representa la señal de control de la luminaria, la segunda cifra la señal de control de carga de la batería, la tercera el modo de funcionamiento y la cuarta cifra es el intervalo de balizamiento (en segundos).

Una vez los datos son introducidos el servidor se mantiene a la espera de la próxima ventana de tiempo para transmitir; cuando recibe un mensaje desde el nodo. Tras la transmisión se mantiene a la escucha esperando confirmación de que la trama se ha recibido, si no la recibe permanece a la escucha durante un tiempo y vuelve a reintentar el envío.

3.4 Pruebas finales

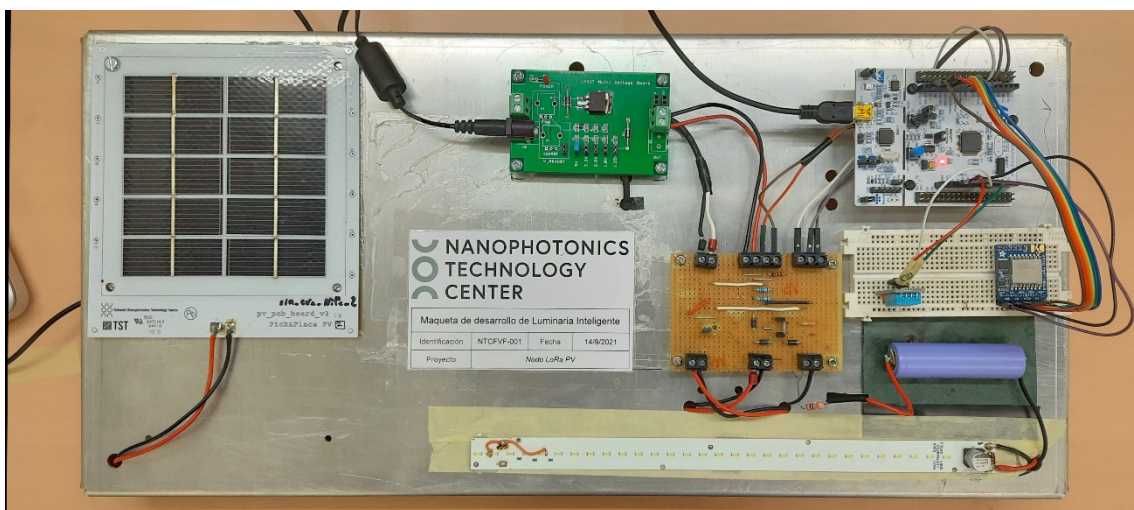


Figura 64. Aspecto final de la maqueta de desarrollo del nodo luminaria (Elaboración propia).

Se han realizado pruebas de funcionamiento de la luminaria y carga de la batería en el laboratorio. En estas pruebas se han comunicado desde el servidor los nuevos parámetros de funcionamiento para apagar y encender la luminaria y activar y desactivar la carga a distancia. El servidor es otra tarjeta de desarrollo con un módulo de conectividad LoRa en el que se introducían los nuevos parámetros por puerto de serie.

También se ha confirmado que la tarjeta puede cargar la batería en el exterior a partir del módulo fotovoltaico. Sin embargo, la maqueta no es totalmente autónoma, ya que, aunque las comunicaciones, tarjeta de desarrollo y tarjeta de interconexión pueden funcionar utilizando la energía de la batería, la luminaria funciona a 20 V, por lo que requiere una fuente externa para ella.

Podría convertirse en un sistema totalmente autónomo incorporando un convertidor de tensión de 5 a 20 V, aunque esto no es algo necesario para demostrar el funcionamiento del sistema a una escala conceptual.

4. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se ha desarrollado un producto electrónico a partir de unas especificaciones de diseño de producto y posteriormente se ha probado la aplicación. Se han cumplido las expectativas en cuanto a que el producto se ha diseñado y la aplicación permite escenarios de uso en los que la tarjeta desarrollada tienen cierta utilidad. Sin embargo, no ha sido posible comprobar el funcionamiento total de la tarjeta desarrollada Nodo LoRa. El desabastecimiento de semiconductores y componentes electrónicos que actualmente amenaza la industria de los productos electrónicos ha impedido el montaje completo de la tarjeta. Esto no hubiera pasado si se hubiera hecho acopio de los materiales con cierta antelación. Esto es algo que no se ha hecho por no por no formar parte del procedimiento habitual cuando se depende de una empresa externa para la fabricación de la tarjeta.

Hoy en día existen pocos productos que se producen de manera local, pues hasta ahora ha sido más económico y competitivo producirlos en el tercer mundo, aprovechando las mejoras en los transportes y las comunicaciones que han dado lugar a la globalización. Desde que comenzó el fenómeno de la deslocalización de las empresas en los años 90, la cadena de suministro ha ido adquiriendo mayor importancia hasta pasar a ser un elemento vital. Sin embargo, la cadena de suministro ha sido un elemento frágil que ha colapsado ante la situación de la pandemia de COVID-19 y la nueva normalidad. También ha causado impacto el reciente bloqueo del canal de Suez ocasionado cuando el portacontenedores EVER GIVEN quedó atravesado en él (El País, 2021).

La cadena de suministro no ha podido adaptarse con suficiente rapidez al cambio de pautas de consumo de la sociedad. Con ella, también se ha venido abajo la filosofía productiva del *just in time*, pues las industrias manufactureras no tienen suficiente inventario de materias precursoras para continuar con la producción si la cadena de suministro falla puntualmente o se produce algún contratiempo.

Estos factores, sumados a la gran dependencia que existe de la cadena de suministro, han supuesto un golpe para la industria. Esto ha provocado un alza general de los precios y, en algunos casos, indisponibilidad y desabastecimiento de cierto tipo de productos; un caso que se ha sufrido en el presente proyecto. El alza de precios hace que resulte menos interesante depender de otros países para la producción, mientras que el desabastecimiento ha provocado grandes pérdidas económicas y la paralización de ciertos sectores industriales. Por ello, en la actualidad algunas empresas se están replanteando volver a incorporar la producción en sus países de origen y, como se ha mencionado en el apartado 1.1.2, la Industria 4.0 puede ayudar a ello.

Otro aspecto que merece análisis es la sensibilidad de un producto electrónico a los tiempos de ciclo de vida de los elementos que lo forman. Durante su vida productiva y, en menor medida, durante el resto de su vida útil, un producto electrónico tiene dependencia directa de los componentes electrónicos. Una mala elección de estos componentes en la etapa de diseño del producto hace al producto vulnerable a los componentes que se encuentren al final de su ciclo de vida. Si estos componentes quedan obsoletos y no pueden ser encontrados en el mercado,

el producto se ve seriamente amenazado. Esta circunstancia es especialmente crítica si ocurre mientras el producto diseñado todavía se encuentra en fase de producción. De ser así, se incurriría en costes adicionales no previstos, ya que habría que hacer modificaciones en el diseño y reorganizar la producción para poder mantener la integridad del proyecto.

Existen varios enfoques de planificación para enfrentarse a esta problemática. Uno de ellos es hacer acopio de los componentes necesarios para cubrir la producción durante parte de la vida útil del proyecto (*just in case*). Esto evita problemas de abastecimiento cuando existen perturbaciones en la cadena de suministro, pero tiene como desventaja el gran desembolso económico y gastos recurrentes asociados a gestión de stocks que conlleva. Una variación de este método sería comprobar de manera activa que los componentes utilizados en un producto cuya producción se encuentra activa siguen disponibles, ya que, generalmente, los fabricantes de componentes electrónicos suelen hacer pública la discontinuación de sus productos mediante lo que se conoce como *End Of Life Announcement* (EOLA). Vigilar el estado de los elementos de la lista de montaje de un producto requiere personal dedicado a monitorizar el estado de vida de los componentes de manera periódica, aunque podría automatizarse el proceso. Este método de planificar las compras evitaría el desabastecimiento de componentes por obsolescencia, pero no protegería ante las perturbaciones en la cadena de suministro; sería difícil anticipar en que momento la producción de un componente concreto no va a dar abasto con la demanda instantánea.

Otro método de planificación, que puede combinarse con los anteriores, sería anticipar que componentes pueden quedarse obsoletos durante el tiempo de vida del producto para evitarlos o dejar abierta la posibilidad de utilizar uno alternativo en su lugar. Esta tarea resulta sencilla cuando se trata de productos tiempos de vida cortos, como son los teléfonos móviles o los ordenadores, que tienen un tiempo de vida de unos 2 años. Sin embargo, la previsión se torna difícil y se incrementa el grado de incertidumbre cuando el producto desarrollado tiene un tiempo de vida mayor, como ocurre en las industrias aeroespacial y militar, donde es fácil que un producto tenga un tiempo de vida de 20 años. Los bajos precios de los componentes hacen que hoy en día la industria electrónica sea impulsada por productos comerciales con tiempos de vida cada vez más cortos y no por los productos militares, cómo ocurría durante la guerra fría. Es por eso que en ocasiones en las que los componentes electrónicos no se encuentran disponibles por canales convencionales es necesario recurrir al mercado gris para su obtención.

Por último, otra de las conclusiones que se obtienen de la realización del proyecto es la evidencia de que las fases iniciales del proyecto, las fases de análisis y síntesis, son de gran importancia. Estas son fases cuya importancia se pasa por alto en algunas ocasiones, ya que el tiempo dedicado a ellas no es un tiempo en el que se esté produciendo un elemento tangible que pueda ser monetizado. Sin embargo, no dedicar el tiempo suficiente a esas fases puede hacer necesario replantearse algunos conceptos de la idea inicial cuando ya se está trabajando en el diseño de detalle, lo que significa incurrir en costes significativos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- American National Standards Institute . 1975.** *Reference designations for electrical and electronics parts and equipments.* Nueva York : s.n., 1975. ANSI Y32.16-1975.
- Battery University. 2019.** BU-502: Discharging at High and Low Temperatures. *Battery University.* [En línea] 10 de Julio de 2019. [Citado el: 17 de Agosto de 2021.] <https://batteryuniversity.com/article/bu-502-discharging-at-high-and-low-temperatures>.
- Blackman, James. 2019.** *LPWA connectivity in IoT - who is winning what?* 2019. Enterprise IoT insights - July 2019.
- C. Wadell, Brian. 1991.** *Transmission Line Design Handbook.* Norwood, MA : Artech House, 1991. 0-89006-436-9.
- CincoDías. 2020.** La pandemia expone la falta de conectividad del entorno rural. *CincoDías.* 2020, 30 de Octubre de 2020.
- Colaboradores de Wikipedia. 2014.** Wikipedia. *La enciclopedia libre.* [En línea] 2014. [Citado el: 26 de junio de 2014.] http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Referencia_bibliogr%C3%A1fica&oldid=7.
- Comisión Europea - Dirección General de Redes de Comunicación, Contenido y Tecnología. 2013.** *Iluminando las Ciudades - Acelerando el Despliegue de Soluciones de Iluminación .* s.l. : Comisión Europea, 2013.
- Comision Nacional de los Mercados y la Competencia. 2019.** *INFORME SOBRE CUESTIONES RELACIONADAS CON LA NUMERACIÓN ASOCIADA A LOS SERVICIOS MÁQUINA A MÁQUINA - M2M-*. Madrid : s.n., 2019. INF/DTSA/023/19.
- Deloitte. 2018.** *5G: The chance to lead for a decade.* Stamford : Deloitte Development LLC, 2018.
- Departamento de Proyectos de Ingeniería UPV. 2015.** *PROYECTOS. Diseño de Producto - Colección de apuntes .* Valencia : UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA, 2015. 0370-04-01-01.
- Digitalpolicylaw. 2021.** ¿2G, 3G o ambas? La tendencia del apagado de las redes legacy. *Digitalpolicylaw.* [En línea] 12 de Agosto de 2021. [Citado el: 18 de Agosto de 2021.] <https://digitalpolicylaw.com/2g-3g-o-ambas-la-tendencia-del-apagado-de-las-redes-legacy/>.
- Diodes Incorporated. 2021.** *DS42701 - AP62250 Datasheet.* s.l. : Diodes Incorporated, 2021. DS42701 Rev. 2 - 2.
- EBVElektronik. 2010.** *EBV ARM Guide.* Poing : EBV Elektronik GmbH & Co. KG, 2010. Version 5, February 2010.
- Edison Tech Center. 2013.** The Sodium Lamp - How it works and history. [En línea] Edison Tech Center, 2013. [Citado el: 05 de 08 de 2021.] <https://edisontechcenter.org/SodiumLamps.html#hps>.

- El País. 2001.** El Gobierno quiere cerrar MovilLine para dar dos licencias más de móvil. *El País*. 2001, 18 de Marzo de 2001.
- . **2021.** La crisis del canal de Suez da la puntilla al comercio mundial. *El País*. Web, 2021, 28 de Marzo de 2021.
- . **2003.** Varios pueblos se conectan a Internet por satélite sin esperar al sustituto del TRAC. *El País*. Digital, 2003, 15 de Mayo de 2003.
- ELE Times. 2019.** PCB for low-EMI DC/DC converters: Working & Design. *ELE Times*. [En línea] 29 de Junio de 2019. [Citado el: 14 de Junio de 2021.] <https://www.eletimes.com/pcb-for-low-emi-dc-dc-converters-working-design>.
- Elektor. 2019.** Elektor Lora Node. *Elektor*. [En línea] 2019. [Citado el: 06 de 08 de 2021.] <https://www.elektormagazine.com/labs/lorawan-node-experimental-platform>.
- Eurocircuits.** Technical Specifications of all Eurocircuits Prototype & Small Volume Services – European Origin. *Eurocircuits*. [En línea] [Citado el: 19 de Agosto de 2021.] <https://www.eurocircuits.com/technical-specifications-of-all-eurocircuits-prototype-small-volume-services-european-origin/>.
- HopeRF. 2013.** RFM95W-868S2. 2013.
- How Many Smart Meters can be Deployed in a GSM cell?* **Madueño, Germán Corrales, Stefanovic, Cedomir y Popovski, Petar . 2013.** Budapest : IEEE Communications Society, 2013. 978-1-4673-5753-1.
- IDAE. 2017.** *Inventario, consumo de energía y potencial de ahorro del alumbrado* . 2017.
- Infante, Jorge. 2002.** El desarrollo de la Red Pública de Datos en España (1971-1991): un caso de avance tecnológico en condiciones adversas. *Revista Bit*. Madrid : COIT, 2002. Noviembre - Diciembre 2002.
- Isola. 2017.** *Laminate & Prepreg Manufacturing*. s.l. : Isola group, 2017.
- . **2015.** *IS400 Datasheet*. s.l. : Isola, 2015. 10/15 DSIS400E.
- Likely, Chris. 2003.** Guide to Selecting Inductors for Switching Regulators. *Power Electronics*. [En línea] 1 de Julio de 2003. [Citado el: 15 de Abril de 2020.] <https://www.powerselectronics.com/content/article/21861300/guide-to-selecting-inductors-for-switching-regulators>.
- Linear Technology. 2015.** 300mA Low Voltage Buck-Boost Converter with PowerPath and 1.6µA Quiescent Current. *LTC3106 Datasheet* . 2015. 3106f.
- Lorenzo, Antonio. 2020.** España lanza una ofensiva para cerrar la brecha digital en las zonas rurales. *El Economista*. 2020, 11 de Mayo de 2020.
- McKinsey&Company. 2017.** *The future of connectivity: Enabling the Internet of Things*. 2017. High Tech December 2017.
- muRata. 2016.** *A Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Networks, Application Note M1001* . 2016. ANM1001.

- Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Department of Energy. 2015.** *Energy Conservation Program: Energy Conservation Standards for High-Intensity Discharge Lamps.* Washington D.C. : U.S. Department of Energy, 2015. EERE–2010–BT–STD–0043 ; RIN: 1904-AC36.
- ON Semiconductor. 2006.** *1SMB5913BT3 Series - 3 Watt Plastic Surface Mount Zener Voltage Regulators.* 2006. 1SMB5913BT3/D.
- Pérez Yuste, Antonio. 2002.** *El proceso de implantación de la telefonía móvil en España.* Madrid : COITT, 2002.
- Quectel. 2018.** *L96 Reference Design.* s.l. : Quectel, 2018. Rev. L96_Reference_Design_V1.1.
- . **2020.** *Quectel Product Brochure V6.1.* s.l. : Quectel, 2020.
- Redacción RedesTelecom. 2018.** Las comunicaciones M2M superan los 5 millones en nuestro país. *Redes & Telecom.* 2018, 9/1/2018.
- Ruiz López, Jose , y otros. 2017.** *PATRIMONIO INDUSTRIAL DE PUERTO DE SAGUNTO, CUADERNO DIDÁCTICO.* S : APIVA, 2017. 978-84-697-6135-9.
- Sekalski, Przemek. 2007.** *Electronic Technology Design and Workshop.* Lodz : Technical University of Lodz, Department of Microelectronics and Computer Sciences, 2007. IFE, B&T, V semester.
- Sigfox.** Mapa de Cobertura de la red Sigfox. *Sigfox.* [En línea] [Citado el: 5 de Febrero de 2020.] <https://www.sigfox.com/en/coverage>.
- Smoot, Jeff.** An Introduction to Power-Only USB Type C Connectors . *CUI Devices.* [En línea] [Citado el: 16 de Abril de 2021.] <https://www.cuidevices.com/blog/an-introduction-to-power-only-usb-type-c-connectors>.
- Solar energy radiation measurement with a low–power solar energy harvester.* **López Lapeña, Oscar y Pallàs Areny, Ramon. 2018.** 2018. 0168-1699.
- STMicroelectronics. 2018.** *STM32L431xx Datasheet.* s.l. : STMicroelectronics, 2018. DS11453 Rev 3.
- Switchcraft.** Switchcraft Web Site. [En línea] [Citado el: 15 de Abril de 2021.] <https://www.switchcraft.com/Specification.aspx?Parent=581>.
- TALQ Consortium. 2018.** Centrally Managed Smart City System with TALQ. *TALQ White Paper.* s.l. : TALQ Consortium, 2018.
- TDK. 2017.** *NLCV32-PF Type Inductors Datasheet.* s.l. : TDK, 2017. TDK-20170920.
- Telefónica. 1996.** Folleto Informativo del Servicio Moviline. 1996.
- . **1992.** *Informe anual 1992.* Madrid : Servicio de Publicaciones de Telefónica, 1992.
- . **1995.** Movistar - Video informativo. 1995.
- Texas Instruments. 2015.** *Application Report SLVA689 - I2C Bus Pullup Resistor Calculation.* 2015. SLVA689.
- . **2010.** *BQ25504 Datasheet - Ultra Low-Power Boost Converter With Battery Management For Energy.* 2010. SLUSAH0F.

The Washington Post. 2013. By cracking cellphone code, NSA has ability to decode private conversations. *The Washington Post*. 2013, December 13, 2013.

U.S. Department of Defense. 2007. DoD Permanently Discontinues Procurement Of Global Positioning System Selective Availability. *U.S. Department of Defense News Release*. Washington D.C. : U.S. Department of Defense, 2007. IMMEDIATE RELEASE No. 1126-07.

—. **2005.** *WORK BREAKDOWN STRUCTURES FOR DEFENSE MATERIEL ITEMS*. Washington : U.S. Department of Defense, 2005. MIL-HDBK-881A.

Valencia Nanophotonics Technology Center. 2019. Valencia : s.n., 2019.

Wavecom. 2008. Wavecom Web Site - Q52 Omni: GSM/GPRS, GPS and satellite location and tracking. [En línea] 2008. [Citado el: 25 de 11 de 2008.] <https://web.archive.org/web/20081205081047/http://www.wavecom.com/modules/movie/scenes/products/>.

Wikimedia Commons. 2007. ESD (Susceptible). *Wikimedia Commons*. [En línea] 2007. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ESD_\(Susceptible\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ESD_(Susceptible).svg).



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

PRESUPUESTO

 NANOPHOTONICS
TECHNOLOGY
CENTER

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. Introducción	1
2. Precio de la mano de obra	1
3. Cuadro de precios unitarios	2
4. Cuadros de precios descompuestos.....	3
5. Resumen del presupuesto.....	6

1. Introducción

En esta parte del proyecto se realizan los cálculos necesarios para obtener el presupuesto del presente proyecto. A la hora de calcular el presupuesto deben tenerse en cuenta tanto los costes de desarrollo como los costes de fabricación. Los primeros son los costes relativos al desarrollo del producto, mientras que para calcular los costes de fabricación se tiene en cuenta el coste material de los elementos que componen el producto y los costes asociados al proceso de fabricación de cada unidad.

Para el cálculo de los precios de materiales se toman como referencia los precios extraídos de diversos catálogos industriales y el presupuesto de la empresa ELATE S.A., que ha sido contratada para el montaje de cinco prototipos. Para la amortización de los equipos se ha considerado las horas efectivas de uso de los equipos usados durante poco tiempo (horno de *reflow*, laminadora, cámara climática) y un periodo de 0,25 años (3 meses) para los equipos que se han usado de manera habitual.

2. Precio de la mano de obra

En el proyecto ha trabajado un director de proyecto y un ingeniero industrial realizando labores de desarrollo. El salario anual del ingeniero de desarrollo se estima en 40000 €, mientras que el salario anual del director de proyecto se estima en 55000 €.

Los precios de la mano de obra se han calculado considerando 1800 horas de trabajo anuales con un 60% de horas efectivas de trabajo, esto resulta en un total de 1080 horas facturables al año.

Con estas consideraciones el cuadro de precios de la mano de obra queda de la siguiente manera:

Tabla 10. Cuadro de precios de la mano de obra

Código	Descripción	Unidades	Coste unitario
MO.1	Director de proyecto	h	50.93 €
MO.2	Ingeniero de desarrollo	h	37.04 €

Las horas de trabajo del ingeniero de desarrollo se han distribuido como se ve en el cuadro a continuación:

Tabla 11. Cuadro de mediciones de la mano de obra para el ingeniero de desarrollo.

Actividad	Medición
Desarrollo conceptual	20 h
Pruebas de desarrollo	30 h
Diseño del circuito impreso	105 h
Ensayos en cámara climática	10 h
Ensayos proceso de tropicalizado	10 h
Operaciones de montaje manuales	15 h
Encapsulado módulo fotovoltaico	5 h
Tropicalizado	5 h
Fabricación de maqueta de prueba	50 h
Desarrollo de Firmware	50 h
Total	300 h

Por su parte, el director de proyecto ha tenido una dedicación de 40 horas para el desarrollo conceptual del proyecto.

3. Cuadro de precios unitarios

A continuación, se presentan los cuadros de precios unitarios y descompuestos.

Código	Unidades	Descripción	Medición	Precio	Importe
U01		Desarrollo de Producto			
U01.1	ud.	Desarrollo conceptual	1	2,792.78 €	2,792.78 €
U01.2	ud.	Pruebas de desarrollo	1	1,192.69 €	1,192.69 €
U01.3	ud.	Diseño del circuito impreso	1	4,088.89 €	4,088.89 €
U01.4	ud.	Ensayos en cámara climática	1	435.19 €	435.19 €
U01.5	ud.	Ensayos proceso de tropicalizado	1	472.58 €	472.58 €
		Total Desarrollo de Producto			8,982.12 €
U02		Fabricación de prototipos			
U02.1	ud.	Fabricación prototipo en empresa externa	5	379.05 €	1,895.25 €
U02.2	ud.	Operaciones de montaje manuales	5	119.19 €	595.97 €
U02.3	ud.	Encapsulado módulo fotovoltaico	5	37.67 €	188.36 €
U02.4	ud.	Tropicalizado	5	40.51 €	202.54 €
		Total Fabricación de prototipos			2,882.12 €
U03		Desarrollo de la aplicación			
U03.1	ud.	Fabricación de maqueta de prueba	1	1,954.46 €	1,954.46 €
U03.2	ud.	Desarrollo de Firmware	1	1,851.85 €	1,851.85 €
		Total Desarrollo de la aplicación			3,806.31 €

4. Cuadros de precios descompuestos

Código	Unidades	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
UO1		Desarrollo de Producto			
UO1.1		<i>Desarrollo conceptual</i>			
	h	Director de proyecto	40.00	50.93 €	2,037.04 €
	h	Ingeniero de desarrollo	20.00	37.04 €	740.74 €
	año	PC Sobremesa	0.25	60.00 €	15.00 €
				Total	2,792.78 €
UO1.2		<i>Pruebas de desarrollo</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	30.00	37.04 €	1,111.11 €
	ud.	NUCLEO-L452RE	2.00	14.86 €	29.72 €
	ud.	Arduino Nano R3	2.00	0.00 €	0.00 €
	ud.	Adafruit RFM95W LoRa	2.00	16.90 €	33.80 €
	año	PC Sobremesa	0.25	60.00 €	15.00 €
	año	Multímetro Amprobe 30XR-A	0.25	12.22 €	3.06 €
	año	IDE Arduino	0.25	0.00 €	0.00 €
	año	STM32CubeMX	0.25	0.00 €	0.00 €
				Total	1,192.69 €
UO1.3		<i>Diseño del circuito impreso</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	105.00	37.04 €	3,888.89 €
	año	Estación de trabajo CAD	0.50	400.00 €	200.00 €
	año	Licencia Altium Designer	0.50	0.00 €	0.00 €
				Total	4,088.89 €
UO1.4		<i>Ensayos en cámara climática</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	10.00	37.04 €	370.37 €
	ud.	Cupón de pruebas	1.00	50.00 €	50.00 €
	h	Cámara climática	10.00	1.48 €	14.81 €
				Total	435.19 €
UO1.5		<i>Ensayos proceso de tropicalizado</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	10.00	37.04 €	370.37 €
	ud.	Cupón de pruebas	2.00	50.00 €	100.00 €
	m2	Lámina goma EVA	0.10	5.00 €	0.50 €
	l	Barniz tropicalizado	0.05	34.20 €	1.71 €
				Total	472.58 €

Diseño e implementación de nodo autónomo IoT para una red de área amplia de bajo consumo (LPWAN): aplicación a la gestión de luminarias urbanas inteligentes

Código	Unidades	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U02		Fabricación de prototipos			
U02.1		<i>Fabricación prototipo en empresa externa</i>			
	ud.	Montaje de prototipo	1.00	319.05 €	319.05 €
	ud.	Gastos de preparación línea SMT	0.20	300.00 €	60.00 €
				Total	379.05 €
U02.2		<i>Operaciones de montaje manuales</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	3.00	37.04 €	111.11 €
	ud.	Diodo Schottky ZM4733A-GS18	5.00	0.32 €	1.61 €
	m2	Panel solar	0.01	200.00 €	1.40 €
	h	Horno reflow	3.20	0.06 €	0.18 €
	año	Estación soldadura Weller WD1	0.02	32.00 €	0.64 €
	m	Hilo de soldadura Sn60Pb40	2.00	0.07 €	0.14 €
	ud.	Pasta soldadura Sn63Pb37 Chipquik SMD291AX10	0.20	20.60 €	4.12 €
				Total	119.19 €
U02.3		<i>Encapsulado módulo fotovoltaico</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	1.00	37.04 €	37.04 €
	m2	Lámina goma EVA	0.01	5.00 €	0.04 €
	m2	Lámina ETFE	0.01	9.00 €	0.07 €
	h	Laminadora	3.20	0.17 €	0.53 €
				Total	37.67 €
U02.4		<i>Tropicalizado</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	1.00	37.04 €	37.04 €
	m2	Lámina goma EVA	0.01	5.00 €	0.05 €
	l	Barniz tropicalizado	0.10	34.20 €	3.42 €
				Total	40.51 €

Diseño e implementación de nodo autónomo IoT para una red de área amplia de bajo consumo (LPWAN): aplicación a la gestión de luminarias urbanas inteligentes

Código	Unidades	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
U03		Desarrollo de la aplicación			
U03.1		<i>Fabricación de maqueta de prueba</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	50.00	37.04 €	1,851.85 €
	ud.	Bastidor aluminio	1.00	20.00 €	20.00 €
	ud.	Fuente alimentación 24V 36W	1.00	21.09 €	21.09 €
	ud.	Fuente alimentación 12V 12W	1.00	11.72 €	11.72 €
	ud.	Luminaria LED Osram 7.3W	1.00	3.87 €	3.87 €
	ud.	Celda Litio 18650	1.00	3.85 €	3.85 €
	ud.	Tarjeta multitensión 5V	1.00	9.00 €	9.00 €
	kg	Silicona	0.10	39.94 €	3.99 €
	ud.	Placa de matriz RE200-LF FR4	1.00	6.14 €	6.14 €
	ud.	Bloque de terminal PCB Macho de 2 vías, 5 mm	6.00	0.35 €	2.08 €
	ud.	Transistor NPN BC547	1.00	0.20 €	0.20 €
	ud.	Transistor MOSFET canal N ZVN4206	2.00	0.61 €	1.23 €
	ud.	Diodo rectificador FR20	1.00	0.17 €	0.17 €
	ud.	Diodo Schottky 1N5817	2.00	0.34 €	0.68 €
	ud.	Aislador Wurth Elektronik 10mm	15.00	0.55 €	8.27 €
	ud.	Abrazadera de cable Nylon 66	25.00	0.25 €	6.33 €
	ud.	Tornillo M3*12	15.00	0.12 €	1.80 €
	ud.	Tuerca M3	15.00	0.08 €	1.20 €
	m	Cable multifilar 0,5 mm2	4.00	0.25 €	0.99 €
				Total	1,954.46 €
U03.2		<i>Desarrollo de Firmware</i>			
	h	Ingeniero de desarrollo	50.00	37.04 €	1,851.85 €
	año	IDE Arduino	0.25	0.00 €	0.00 €
	año	STM32CubeMX	0.25	0.00 €	0.00 €
				Total	1,851.85 €

5. Resumen del presupuesto

Descripción		Precio
Desarrollo de Producto		8,982.12 €
Fabricación de prototipos		2,882.12 €
Desarrollo de la aplicación		3,806.31 €
Presupuesto total de ejecución material		15,670.55 €
Gastos generales	12%	1,880.47 €
Beneficio industrial	6%	940.23 €
Presupuesto total de ejecución por contrata		18,491.25 €
IVA	21%	3,883.16 €
Presupuesto base de licitación		22,374.41 €

El presupuesto total asciende a la cantidad de veintidós mil trescientos setenta y cuatro con cuarenta y un céntimos (**22,374.41 €**).



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

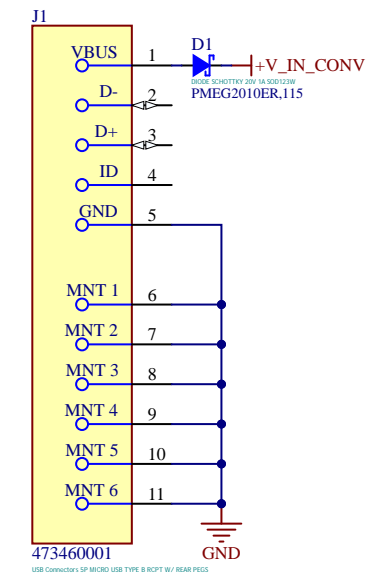
PLANOS

LISTA DE PLANOS

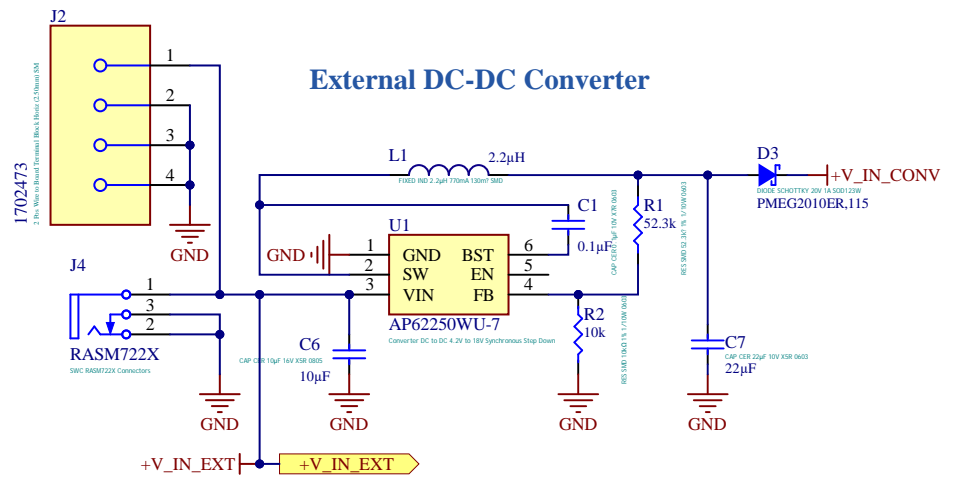
NÚMERO	TÍTULO	PÁGINA
Plano 1	Sistemas de energía	1
Plano 2	Sistema de gestión - Microcontrolador	2
Plano 3	Sistema de radiocomunicaciones	3
Plano 4	Sistema de Geoposicionamiento	4
Plano 5	Elementos mecánicos de la tarjeta	5
Plano 6	Dibujo mecánico de la tarjeta	6
Plano 7	Renderizado de la cara superior de la tarjeta	7
Plano 8	Renderizado de la cara inferior de la tarjeta	8
Plano 9	Esquema de la tarjeta de interconexión A3	9

POWER MANAGEMENT SYSTEM

USB Power Connector

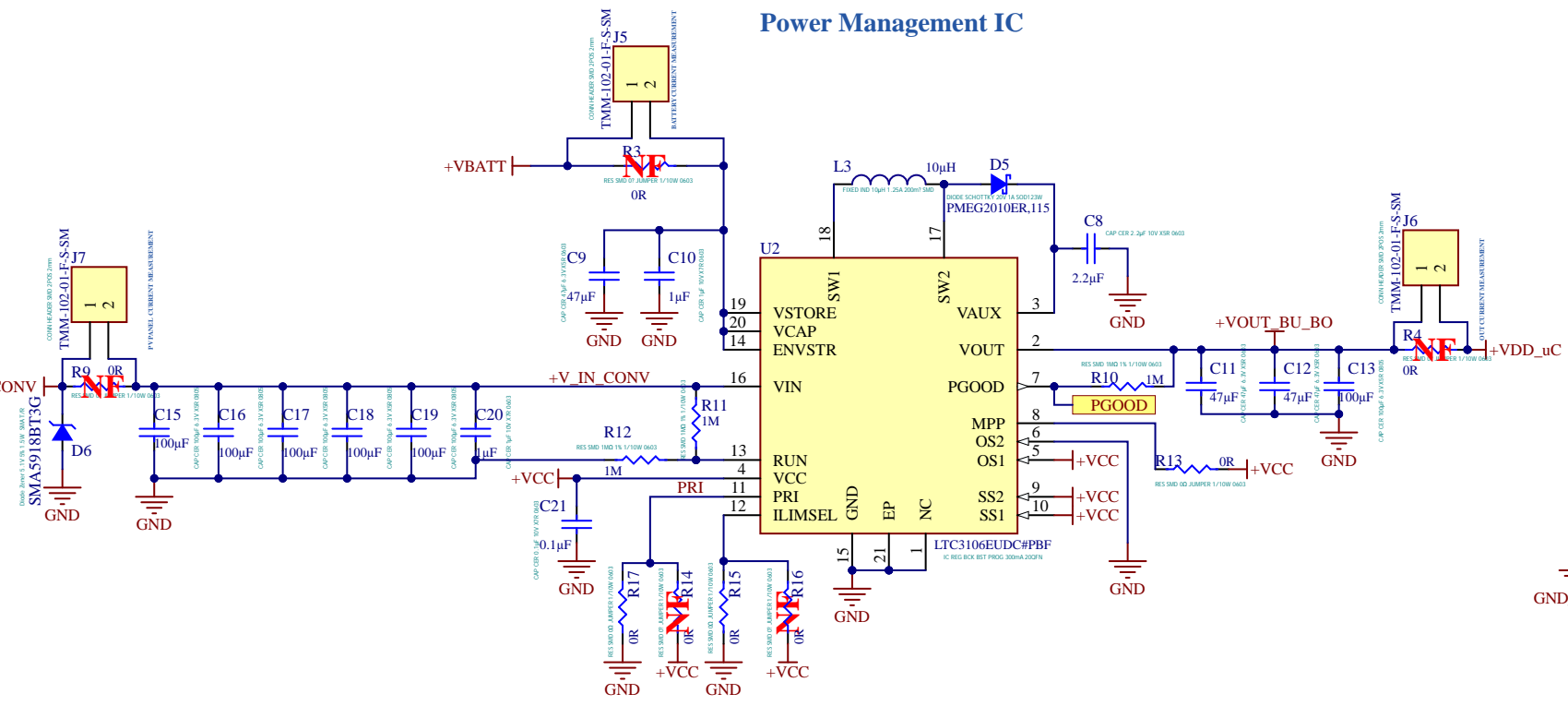


External DC-DC Converter



LAYOUT NOTE:
Review layout notes in the data sheet page 2.

Power Management IC



DESIGN NOTE:

- Supply Voltage: VIN Min = 0.35 Volts | VIN Max = 5.1 Volts.
- Supply Current: Shutdown: 300nA (Typ) | 750nA (Max). Quiescent: 0.1µA (Typ) | 1µA (Max).

DESIGN NOTE:

PGOOD (Pin 7): Power Good Indicator. Open-drain output that is pulled to ground if VOUT falls 8% below its programmed voltage.

DESIGN NOTE:

PRI (Pin 11): Primary Battery Enable Input:
 GND Secondary battery and enable charging.
 VCC Non-rechargeable primary battery.

SS1, SS2 (Pins 10, 9): VSTORE Select Programming Inputs.

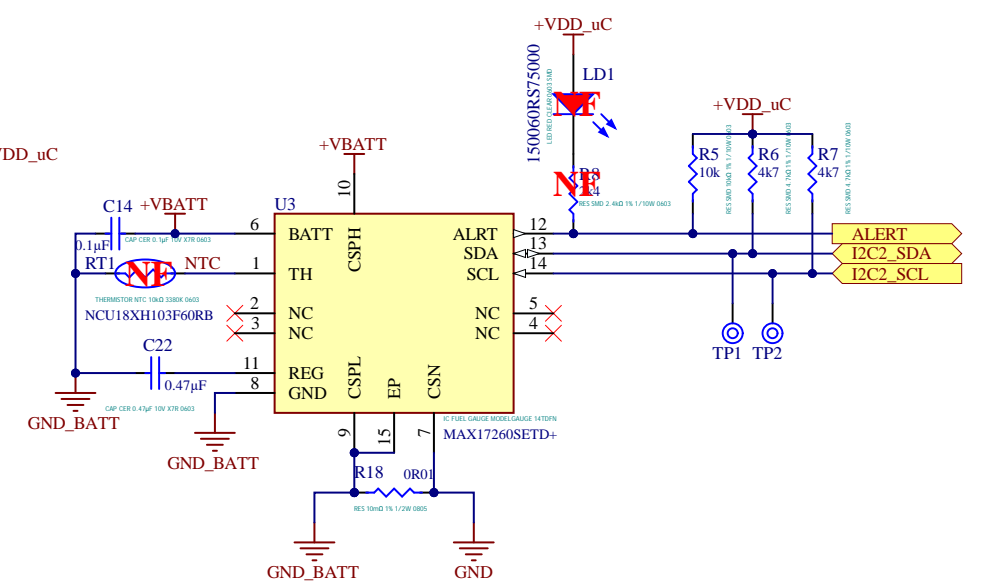
PRI	SS1	SS2	VSTORE OV	VSTORE UV	BATTERY TYPE
GND	GND	GND	4V	2.78V	Li Carbon
GND	GND	VCC	2.9V	1.9V	2x Rechargeable NiMH
GND	VCC	GND	3V	2.15V	Rechargeable Li Coin Cell
GND	VCC	VCC	4V	3V	Li Polymer/Graphite
VCC	GND	GND	4.2V	2.1V	Primary, Non-Rechargeable

DESIGN NOTE:

Output Voltage Selection:

OS1	OS2	VOUT
GND	GND	1.8V
GND	VCC	2.2V
VCC	GND	3.3V
VCC	VCC	5.0V

1-Cell Fuel Gauge



DESIGN NOTE:

- Supply Voltage: VBATT Min = 2.3 Volts | VBATT Max = 4.9 Volts.
- Supply Current: Shutdown: 0.5µA (Typ) | 0.9µA (Max). Hibernate: 5.1µA (Typ) | 12µA (Max). Active: 15µA (Typ) | 30µA (Max).

The Alert Threshold registers allow interrupts to be generated by detecting a high or low voltage, current, temperature, or state-of-charge. Interrupts are generated on the ALRT pin open-drain output driver. An external pullup is required to generate a logic-high signal.

DESIGN NOTE:

I2C 7-bit address: 0x36
 MSB 0 1 1 0 | 1 1 0 R/W

LAYOUT NOTE:
Review layout notes in the data sheet on page 28.

LoRa Node PV Board

Sistemas de energía

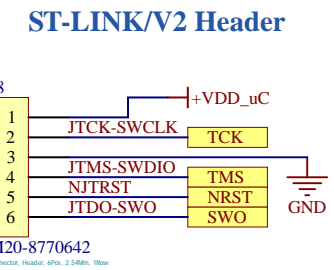
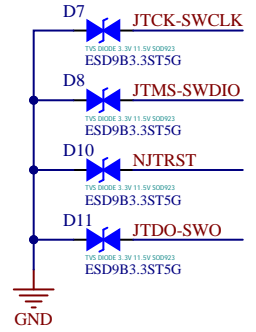
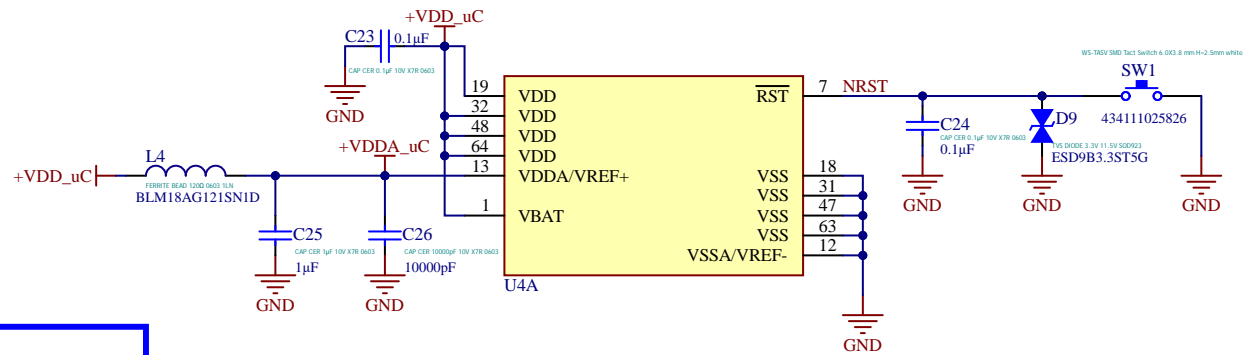
Document Number: PLANO 1 | Revision: 0A | Date: 9/12/2021



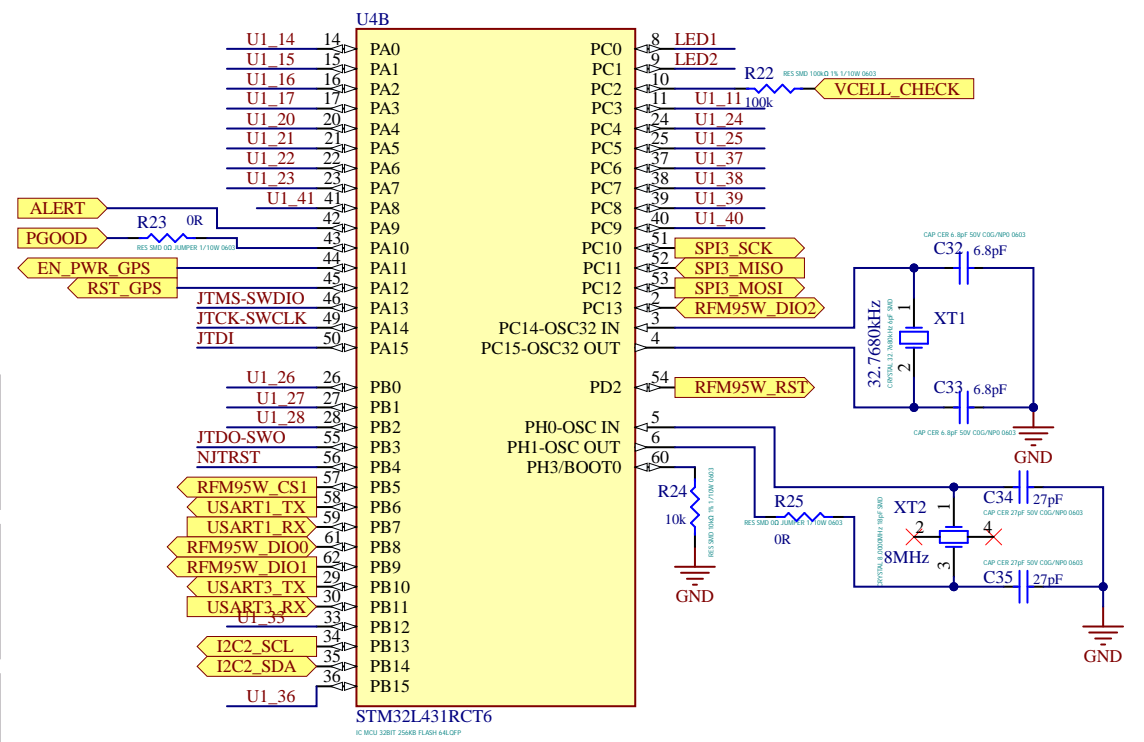
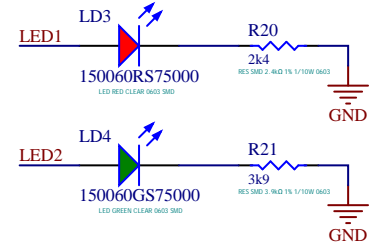
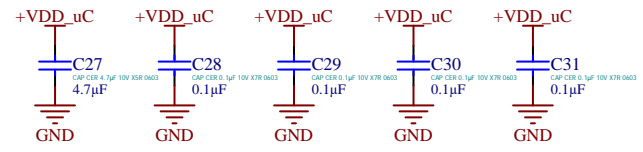
DESIGN NOTE:
Review 5.6 of application note AN2586 on page 21/28 for unused I/Os connection.

LAYOUT NOTE:
Review application note AN2867 on page 33/43 for PCB design examples.

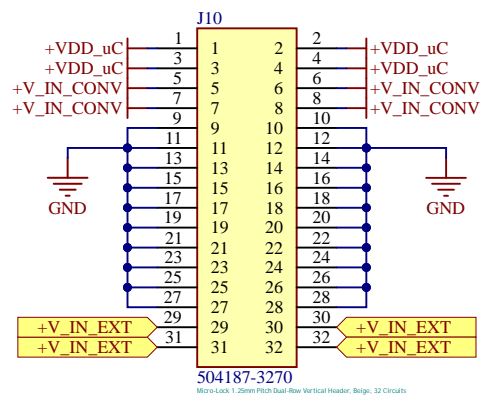
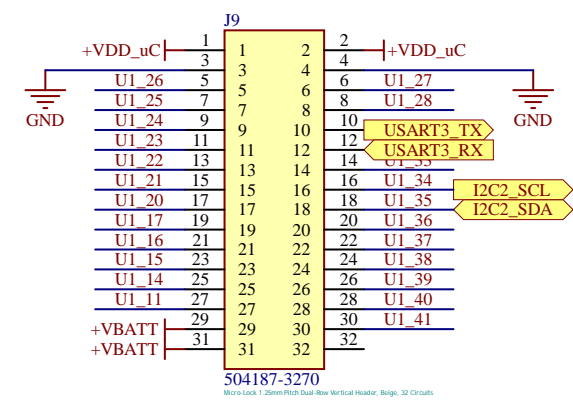
DESIGN NOTE:
All main power (VDD, VDDA, VBAT) and ground (VSS, VSSA) pins must always be connected to the external power supplies, in the permitted range.



LAYOUT NOTE:
Route order JTAG -> I2C -> GPIO



Expansion



DESIGN NOTE:
Review Table 20 of Datasheet DS11453 on page 87 for IC current characteristics.

DESIGN NOTE:
Review 6.3.15 of Datasheet DS11453 on page 136 for NRST connection.

DESIGN NOTE:
Review 6.3.18 of Datasheet DS11453 on page 150 for ADC characteristics.

DESIGN NOTE:
Review pinout on page 56 of Datasheet DS11453 STM32L4
Interrupts in any GPIO pins with EXTI (page 48)
GPIO pins can be selected to alternate functions AF through GPIOx_AFR registers, page 36.
JTAG pins configured to AF0 after reset.
(USART3_TX PB10/PC10/PD8), given in STM32DUINO library as AFNUM, but bootloader only able to flash for default USART PINS

uC Ports		Interface	Pin
GPS	USART1	USART1	PB6 TX PB7 RX
DEBUG	USART3	USART3	PB10 TX PB11 RX
LoRa	SPI3	SPI3	PC10 SCK PC11 MISO PC12 MOSI
FUEL GAUGE	I2C2	I2C2	PB13 SCL PB14 SDA

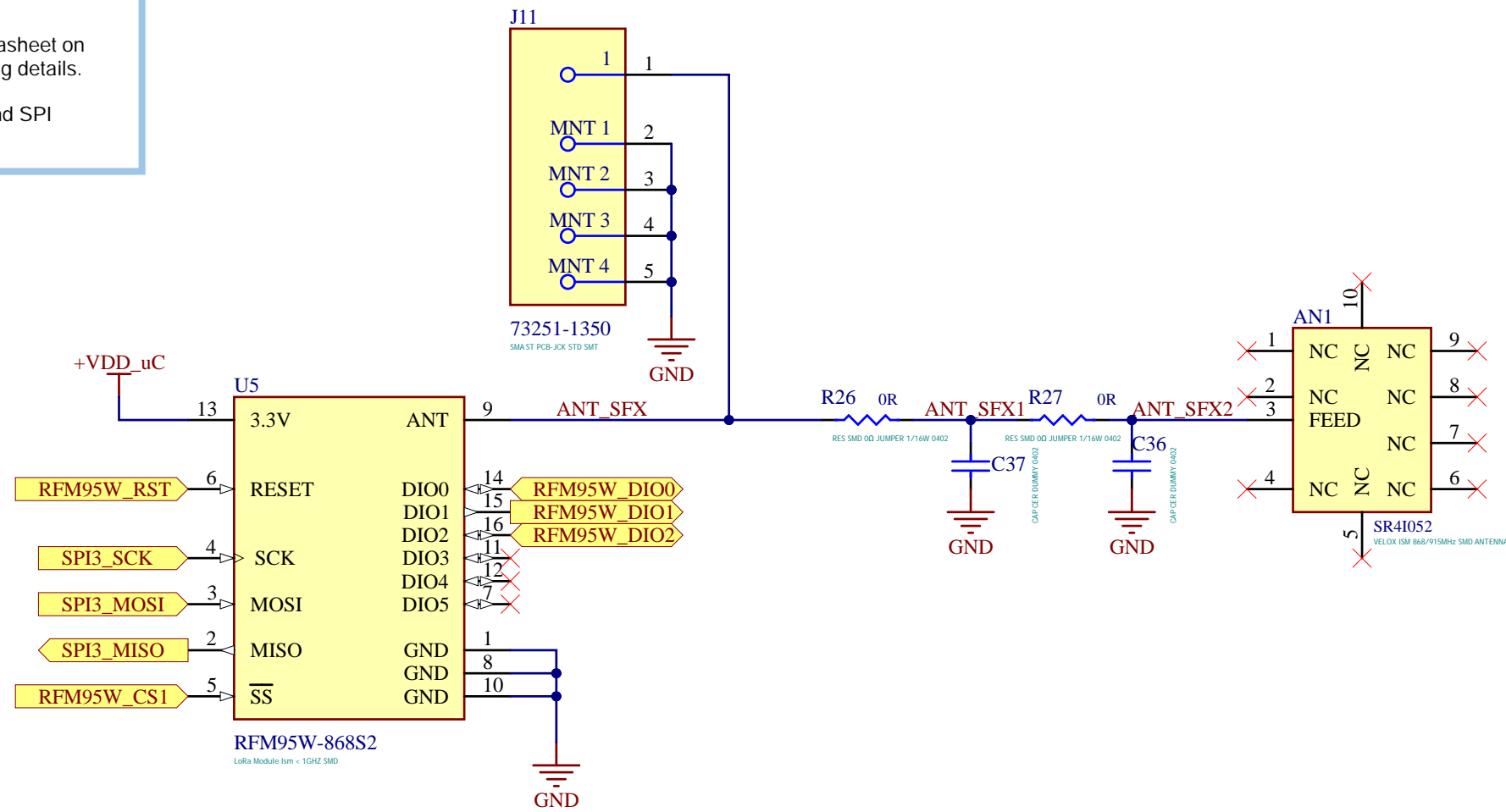
DESIGN NOTE:
Review understanding the basics of the Pierce oscillator (Ticket 1380):
 $CL = (CIN + C1) \times (C2 + COUT) / (CIN + C1 + C2 + COUT) + CStray$
For ABMM2-8.000MHZ-E2-T:
CL=18pF
C1=C2=C
For STM32L4 and HSE:
CIN=5pF
COUT=10pF
CStray=0.5pF

LoRa MODULE & ANTENNA

DESIGN NOTE:

Review Table 17 of Datasheet on page 42 for DIO mapping details.

2 Access points: DIO and SPI (Page 69)



DESIGN NOTE:

- Vcc Min = 1.8 Volts | Vcc Max = 3.7 Volts

1. Tx Current

120 mA @ +20 dBm
87 mA @ +17 dBm

2. Rx Current: 11.5 mA

3. Stand-by current: 1.6 mA

4. Sleep Current: 0.2 μA

LoRa Node PV Board

Sistema de comunicaciones

Document Number:
PLANO 3

Revision:
0A

Date:
9/12/2021

**NANOPHOTONICS
TECHNOLOGY
CENTER**

A4

Página 3 de 9

GNSS MODULE

LAYOUT NOTE:

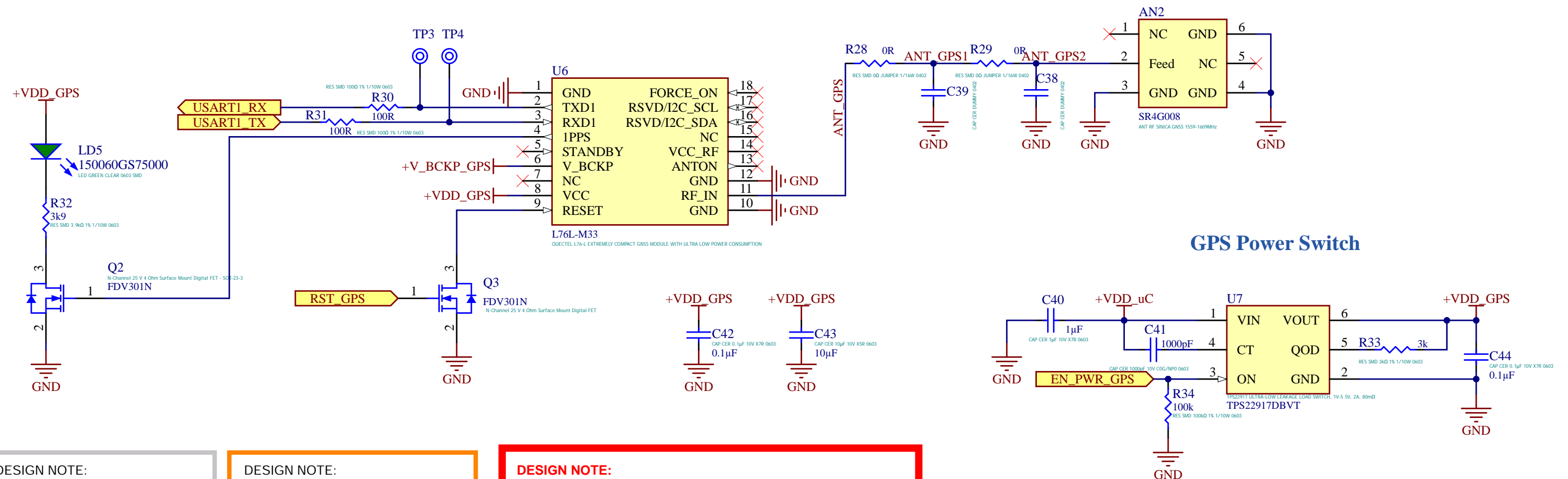
1. The decouple combination of 10uF and 100nF capacitor is recommended nearby VCC pin.
2. The decouple combination of 4.7uF and 100nF capacitor is recommended nearby V_BCKP pin.

DESIGN NOTE:

Rxx and Rxx in the UART are reserved for debugging the waveform of UART, and they are also beneficial to ESD protection. Generally, 100R for RXX and RXX is recommended, but 0R also works well.

DESIGN NOTE:

Pi circuit reserved for impedance matching. C38 and C39 not mounted by default, R19 is 0R



DESIGN NOTE:
The 1PPS indicator will blink at 1Hz frequency after fixing the position.

DESIGN NOTE:
Use the reference reset circuit and a pulldown time > 10msec.

DESIGN NOTE:

- Vcc Min = 2.8 Volts | Vcc Max = 4.3 Volts | Vcc Typ = 3.3V

Full on Mode Current:

1. Power On: 40 mA for a few seconds.
2. Acquisition State (for a several minutes):
 1. GPS: 25mA .
 2. GPS+GLONASS: 29mA.
3. Tracking State:
 1. GPS: 19mA.
 2. GPS+GLONASS: 22mA.

Standby Mode Current:

1. Using STANDBY pin: 600µA & Vcc=3.3V.
2. Using PMTK command: 500µA & Vcc=3.3V.

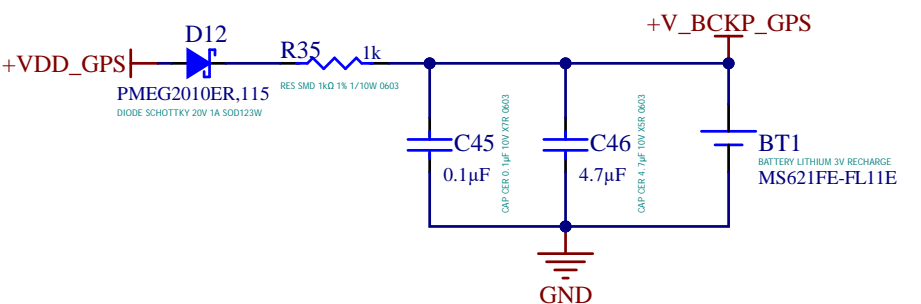
Backup Mode Current: 7µA

DESIGN NOTE:
TPS22917DBVT

Vin Min = 1 Volts | Vin Max = 5.5 Volts
 Quiescent Current: 0.5 µA(Typ) 1.2 µA(Max).
 Shutdown Current: 10 nA(Typ) 250 nA(Max).
 I_{max}=2A; Ron=90mΩ.

LAYOUT NOTE:
TPS22917DBVT: Review layout notes in the data sheet on the page 19.

Charge Circuit for RTC Logic



1

2

3

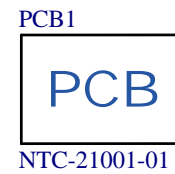
4

A

A

MECHANICAL

PCB



TOP CIRCUIT FIDUCIALS



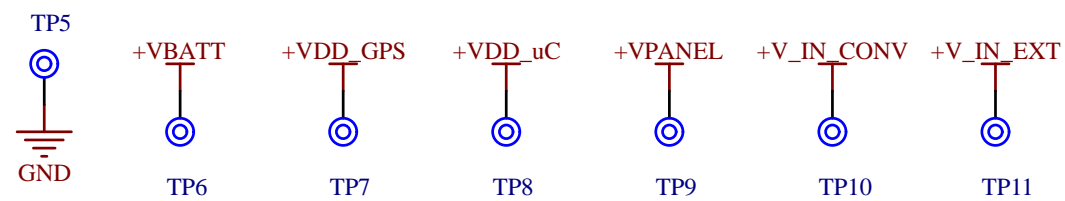
B

B

C

C

POWER SUPPLY TEST POINTS



D

D

LoRa Node PV Board			
Elementos mecánicos de la tarjeta			
Document Number: PLANO 5	Revision: 0A	Date: 9/12/2021	A4 Página 5 de 9

1

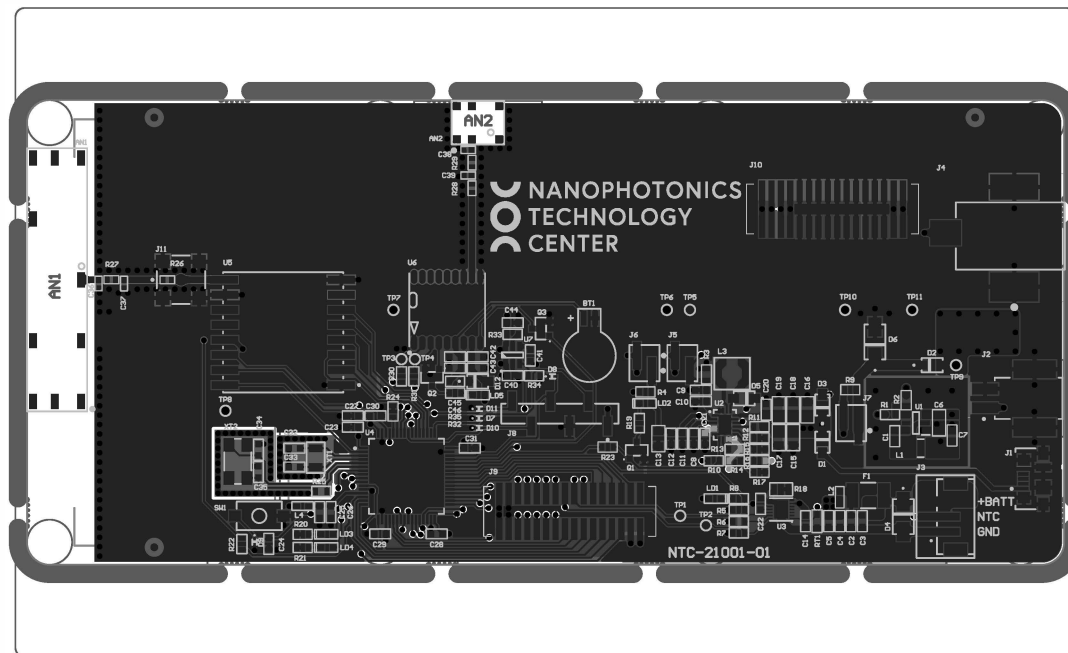
2

3

4

Mechanical Drawing LoRa Node PV Board NTC-21001-01

V0RA



LoRa Node PV Board		V0RA
Jorge Argente	jorarga1@upv.edu.es	
(c) 2021 Nanophotonics Technology Center https://ntc.webs.upv.es/		

BOARD INFO:

Minimum Track: 150 um
 Minimum Gap: 150 um
 Minimum Through Hole VIA: 0.70 mm (pad) / 0.3 mm (drill). Drilling L1-L4
 uVIA: -
 Buried VIA: -

1. REMOVE ALL NON-FUNCTIONAL INNER LAYER PADS.
2. THIS BOARD CONTAINS IMPEDANCE CONTROLLED TRACKS
3. FINISHED PANEL THICKNESS: TO BE APPROXIMATELY 1.60 mm
4. BOARD FINISH ENIG: GOLD IMMERSION Au/ELECTROLESS Ni: 0.05-0.12 um GOLD, 3-6 um NICKEL
5. SOLDER RESIST: APPLY TO BOTH SIDES COLOR - GREEN
6. COMPONENT DESIGNATOR: WHITE COLOUR
7. VIA FILLING: WITH RESIN

Layer	Name	Material	Thickness	Constant	Board Layer Stack
	Top Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	0.015mm	4	
1	[L1] - Top Layer	Copper	0.035mm		
	Prepeg 7628x2		0.360mm	4.2	
2	[L2] - INT1 [VCC]	Copper	0.035mm		
	Core NO.71		0.710mm	4.2	
3	[L3] - INT2 [GND]	Copper	0.035mm		
	Prepeg 7628x2		0.360mm	4.2	
4	[L4] - Bottom Layer	Copper	0.035mm		
	Bottom Solder	Solder Resist	0.015mm	4	
	Bottom Overlay				

GERBER FILES:

- *.GTO - Top Overlay
- *.GTP - Top Paste
- *.GTS - Top Solder
- *.GTL - [L1] - Top Layer
- *.GP1 - [L2] - INT1 [VCC]
- *.GP2 - [L3] - INT2 [GND]
- *.GBL - [L4] - Bottom Layer
- *.GBS - Bottom Solder
- *.GBP - Bottom Paste
- *.GB0 - Bottom Overlay
- *.GM4 - Manufacturing Notes
- *.GM5 - Board Outline
- *.GM6 - Mechanical Drawing
- *.GM10 - Milling

LoRa Node PV Board

Dibujo mecánico de la tarjeta

Document Number:
PLANO 6

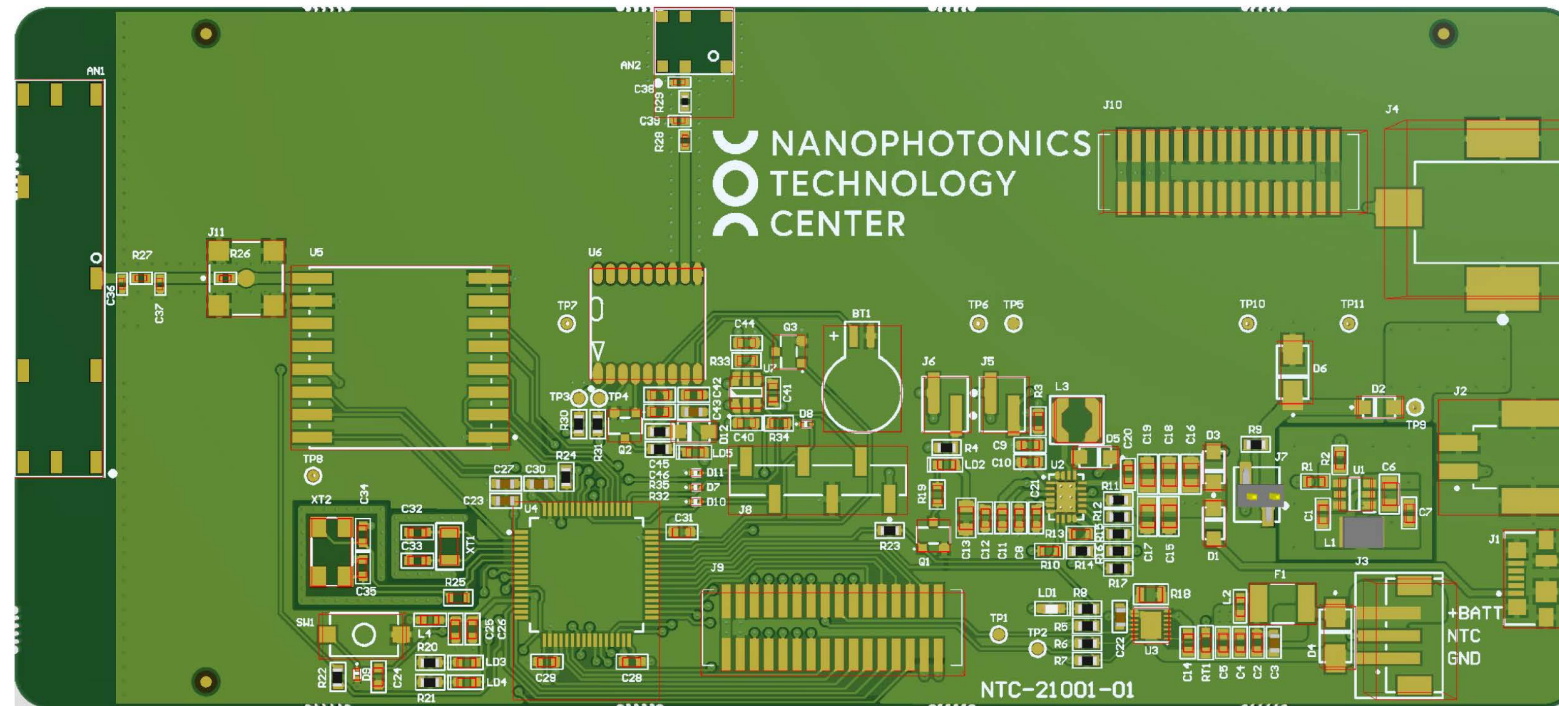
Revision:
0A

Date:
9/12/2021

**NANOPHOTONICS
TECHNOLOGY
CENTER**

A4

Página 6 de 9



LoRa Node PV Board

Renderizado de la cara superior de la tarjeta



Document Number: PLANO 7

Revision: 0A

Date: 9/12/2021

A4

Página 7 de 9

1

2

3

4

A

A

B

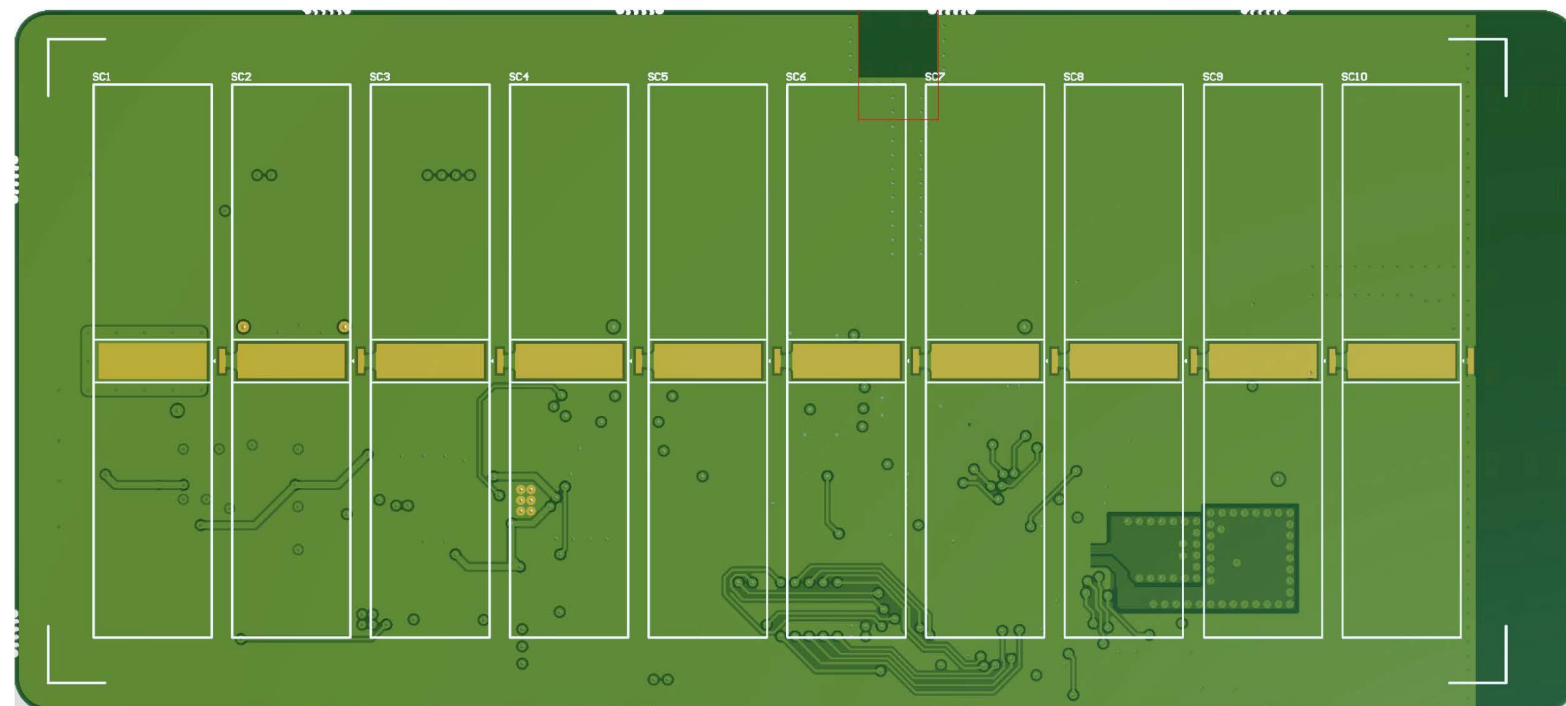
B

C

C

D

D



LoRa Node PV Board

Renderizado de la cara inferior de la tarjeta



Document Number: PLANO 8

Revision: 0A

Date: 9/12/2021

A4

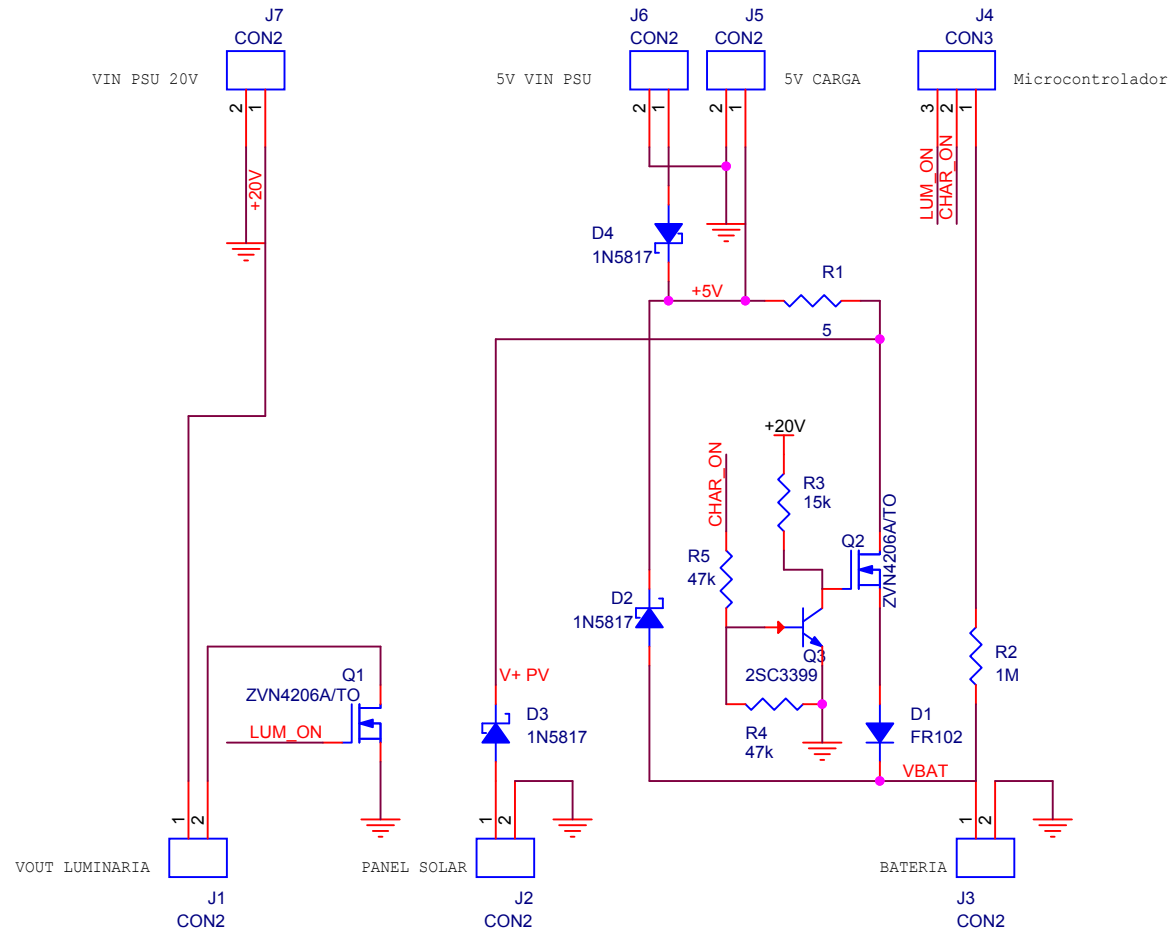
Página 8 de 9

1

2

3

4



CONTROL LUMINARIA

CARGADOR BATERÍA

Maqueta de desarrollo de Nodo Luminaria			
Title Esquema de la tarjeta de interconexión A3			
Size A4	Document Number PLANO 9	Rev A	
Date: Monday, September 13, 2021	Página 9	de	9



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



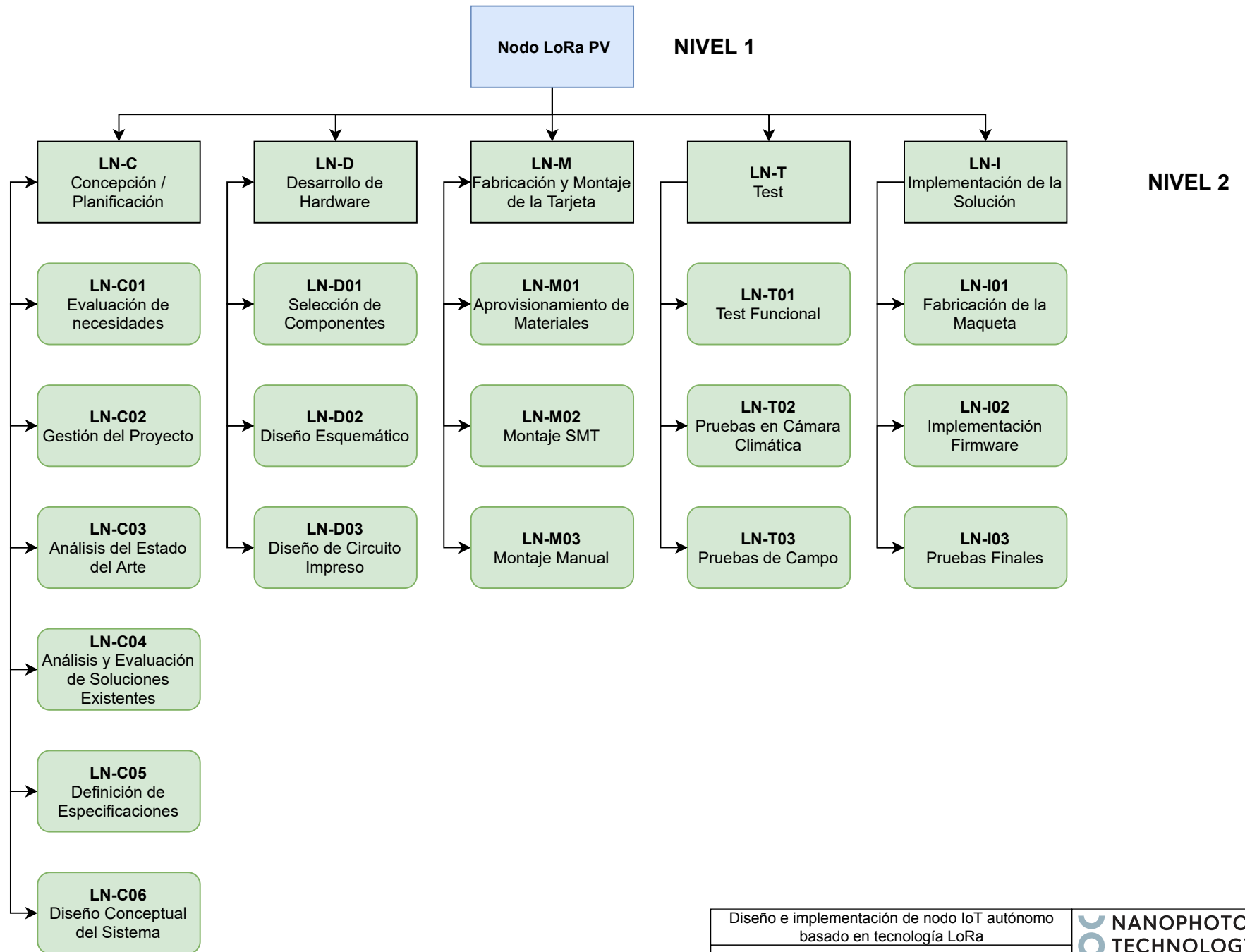
ESCUOLA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.	Organización del proyecto	1
A.1	EDT del proyecto	2
A.2	Planificación temporal del proyecto	3
Anexo B.	Diagramas.....	4
B.1	Nodo LoRa PV - Diagrama funcional del sistema	5
B.2	Nodo LoRa PV - Diagrama funcional de los sistemas de Energía	6
B.3	Nodo LoRa PV - Diagrama detallado del sistema	7
Anexo C.	Lista de materiales	8
Anexo D.	Código.....	10
D.1	Firmware del Nodo.....	10
D.2	Firmware del Servidor	13
Anexo E.	Cálculos	16
E.1	Cálculo del consumo máximo del circuito integrado LTC3106	16
E.2	Cálculo de la corriente de inductor del convertidor de tensión AP62250.....	16
E.3	Cálculo de las resistencias de ajuste de tensión de entrada mínima al integrado LTC3106.....	16
E.4	Cálculo de las dimensiones de las guías de onda coplanar	17

ANEXO A. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO



Programación Proyecto Nodo LoRa PV

TAREA	FECHA INICIO	FECHA FIN	DURACIÓN (DÍAS)	MIEMBRO DEL EQUIPO	PROGRESO	Gantt Chart																																										
						DIC	ENE	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEPT																																	
						50	51	52	53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Concepción y Planificación																																																
Evaluación de necesidades	12/2	12/18	16	JP, GS, JAG	100%																																											
Análisis del estado del arte	12/2	12/18	16	JAG	100%																																											
Análisis y evaluación de soluciones existentes	12/2	12/18	16	JAG	100%																																											
Definición de especificaciones	1/15	2/1	16	JAG	100%																																											
Diseño conceptual del sistema	1/19	3/15	56	JAG	100%																																											
Redacción de la memoria	7/12	8/25	43	JAG	90%																																											
Desarrollo de Hardware																																																
Selección de componentes	3/15	4/16	31	JAG	100%																																											
Diseño esquemático	3/15	5/11	56	JAG	100%																																											
Diseño de circuito impreso	3/29	7/9	100	JAG	100%																																											
Ensayos Tropicalizado	8/30	9/3	3	JAG	10%																																											
Fabricación y montaje de la tarjeta																																																
Aprovisionamiento de materiales	7/12	7/23	11	JAG	100%																																											
Fabricación PCB	7/26	8/6	10	EXT	100%																																											
Montaje SMT	8/23	8/30	7	EXT	100%																																											
Montaje Manual	8/31	9/3	3	JAG	50%																																											
Test																																																
Test Funcional	9/6	9/7	1	JAG	0%																																											
Pruebas en Cámara Climática	9/7	9/8	1	JAG	100%																																											
Pruebas de Campo	9/8	9/10	2	JAG	20%																																											
Implementación de la Solución																																																
Fabricación de la Maqueta	8/23	9/3	10	JAG	100%																																											
Implementación de Firmware	8/30	9/3	3	JAG	100%																																											
Pruebas Finales	9/6	9/10	4	JAG	100%																																											

Diseño e implementación de nodo IoT autónomo basado en tecnología LoRa

Planificación temporal del proyecto

Doc. Number: LN-PLN

Revision:

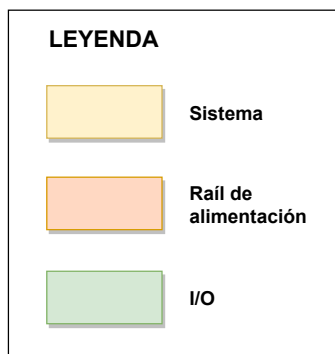
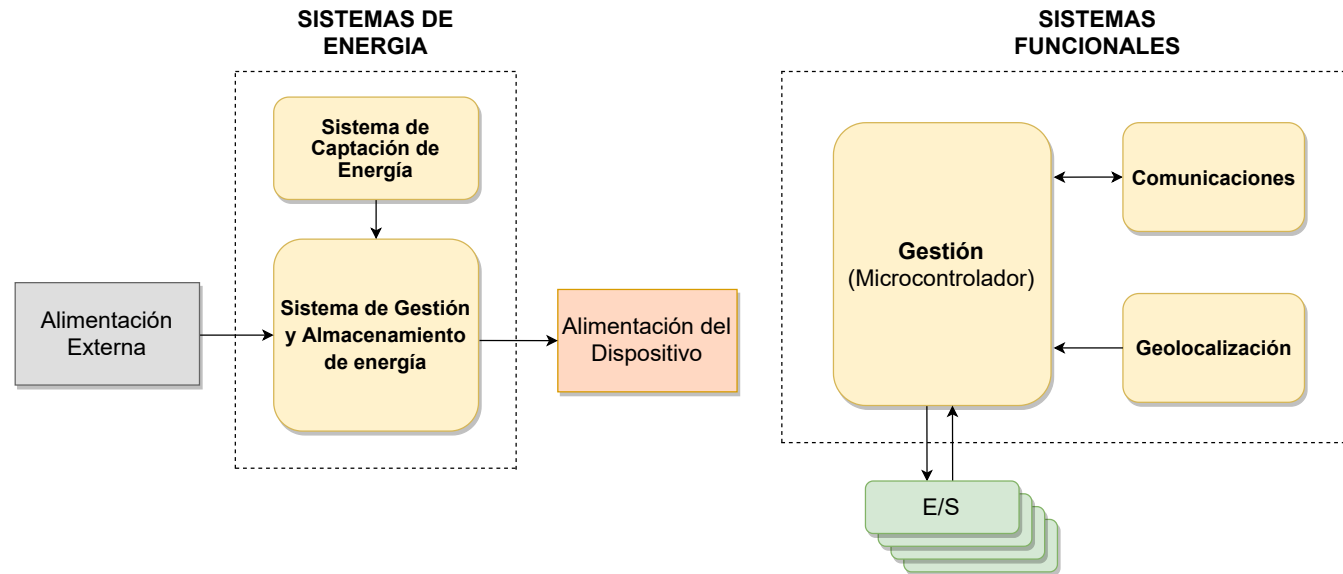
Date: 15/9/2021



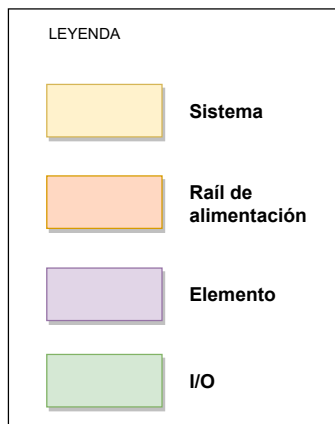
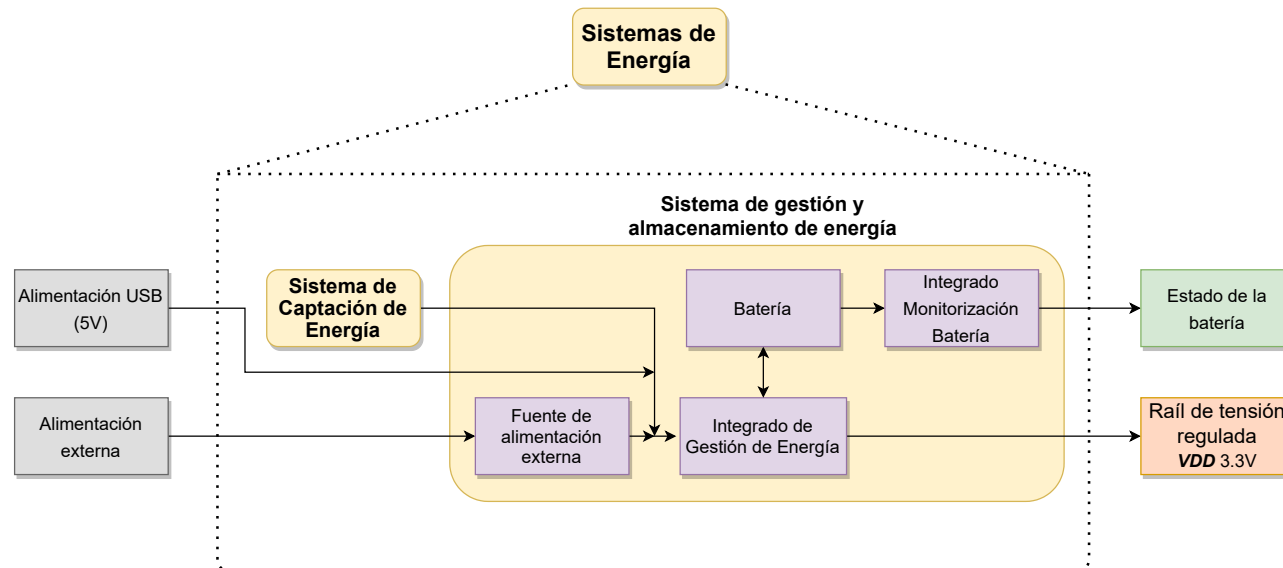
A4

Página 2 de 2

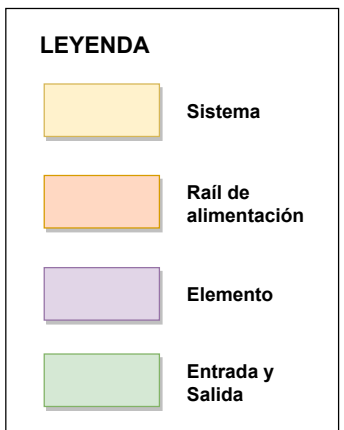
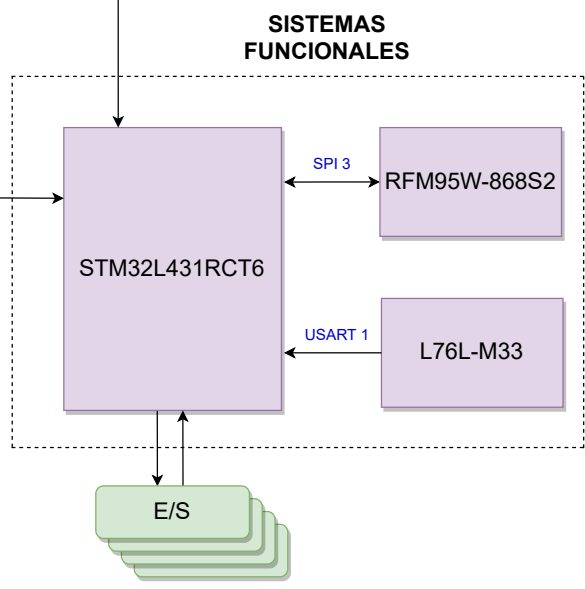
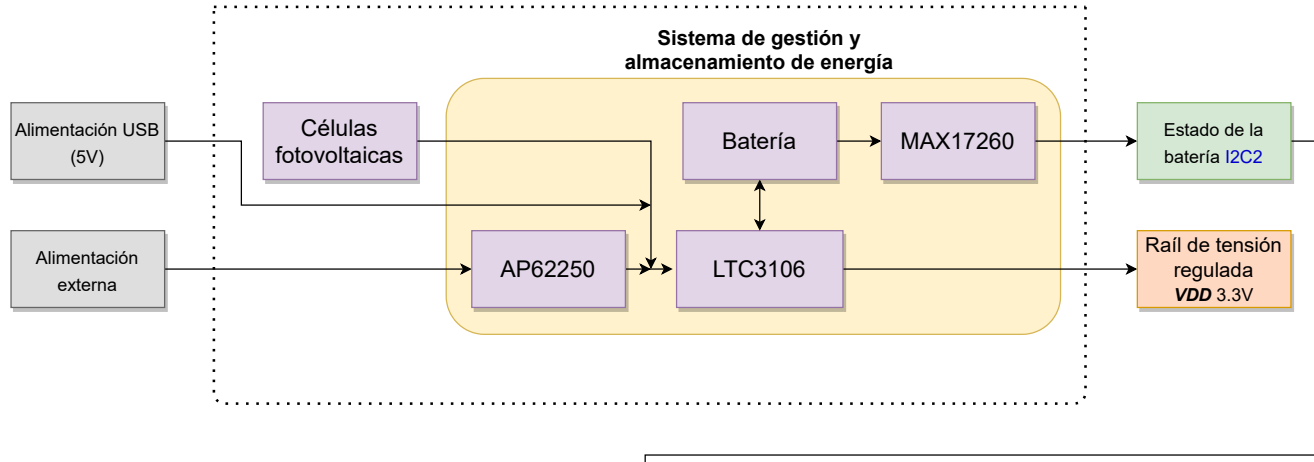
ANEXO B. DIAGRAMAS



Nodo LoRa PV			
Diagrama Funcional del Sistema			
Doc. Number:	Revision:	Date:	A4
Diagrama 1	A	29/8/2021	Página 1 de 3



Nodo LoRa PV				
Diagrama Funcional de los Sistemas de Energía				
Doc. Number:	Revision:	Date:	A4	Página 2 de 3
Diagrama 2	A	29/8/2021		



ANEXO C. LISTA DE MATERIALES

Origen de los datos:		LoRa_Node_PV_Board_V0RA.PrjPcb		
Proyecto:		LoRa_Node_PV_Board_V0RA.PrjPcb		
Variante:		Prototype		
Cantidad	Descripción	Designador	Fabricante	Número de Pieza
1	VELOX ISM 868/915MHz SMD ANTENNA	AN1	Antenova	SR4I052
1	ANT RF SINICA GNSS 1559-1609MHz	AN2	Antenova	SR4G008
1	BATTERY LITHIUM 3V RECHARGE	BT1	Seiko Instruments	MS621FE-FL11E
14	CAP CER 0.1µF 10V X7R 0603	C1, C3, C4, C14, C21, C23, C24, C28, C29, C30, C31, C42, C44, C45	Würth Electronics Inc.	885012206020
3	CAP CER 10µF 10V X5R 0603	C2, C5, C43	Murata Electronics North America	GRM188R61A106MAALD
1	CAP CER 10µF 16V X5R 0805	C6	Murata Electronics North America	GRM21BR61C106KE15K
1	CAP CER 22µF 10V X5R 0603	C7	Taiyo Yuden	LMK107BBJ226MA-T
1	CAP CER 2.2µF 10V X5R 0603	C8	Taiyo Yuden	LMK107BJ225MK-T
3	CAP CER 47µF 6.3V X5R 0603	C9, C11, C12	Murata Electronics North America	ZRB18AR60J476ME01L
4	CAP CER 1µF 10V X7R 0603	C10, C20, C25, C40	Taiyo Yuden	LMK107B7105KA-T
6	CAP CER 100µF 6.3V X5R 0805	C13, C15, C16, C17, C18, C19	Murata	GRM21BR60J107ME15L
1	CAP CER 0.47µF 10V X7R 0603	C22	Würth Electronics	885012206024
1	CAP CER 10000pF 10V X7R 0603	C26	Würth Electronics Inc.	885012206014
2	CAP CER 4.7µF 10V X5R 0603	C27, C46	Taiyo Yuden	LMK107BJ475KA-T
2	CAP CER 6.8pF 50V C0G/NP0 0603	C32, C33	Würth Electronics Inc.	885012006050
2	CAP CER 27pF 50V C0G/NP0 0603	C34, C35	KEMET	C0603C270J5GACTU
2	CAP CER DUMMY 0402	C38, C39		
1	CAP CER 1000pF 10V C0G/NP0 0603	C41	Würth Electronics Inc.	885012006014
5	DIODE SCHOTTKY 20V 1A SOD123W	D1, D2, D3, D5, D12	Nexperia	PMEG2010ER,115
1	TVS DIODE 7V 12V DO214AC	D4	Würth Electronics	824501700
1	Diode Zener Single 5.1V 5% 500mW Automotive 2-Pin SMA T/R	D6	ON Semiconductor	SMA5918BT3G
5	TVS DIODE 3.3V 11.5V SOD923	D7, D8, D9, D10, D11	ON Semiconductor	ESD9B3.3ST5G
1	FUSE PTC RESET FUSE 30V 300MA 1812	F1	Bourns	MF-MSMF030-2
1	USB Connectors 5P MICRO USB TYPE B RCPT W/ REAR PEGS	J1	Molex	0473460001
1	CONN 2 Position Wire to Board Terminal Block Horizontal with Board 0.098" (2.50mm) Surface Mount	J2	Phoenix Contact	1702473
1	HEADER 3POS MALE 2.00mm SMD	J3	Würth Elektronik eiSos GmbH	620303124022
1	Power Jack, 5 A, 250 V, 3-Pin SMD, RoHS, Bulk	J4	Switchcraft	RASM722X
3	CONN HEADER SMD 2POS 2mm	J5, J6, J7	Samtec	TMM-102-01-F-S-SM
1	Header, 6-Pin, Single row	J8	Harwin	M20-8770642
2	Micro-Lock 1.25mm Pitch Dual-Row Vertical Header, Beige, 32 Circuits	J9, J10	Molex	504187-3270

Diseño e implementación de nodo autónomo IoT para una red de área amplia de bajo consumo (LPWAN): aplicación a la gestión de luminarias urbanas inteligentes

Cantidad	Descripción	Designador	Fabricante	Número de Pieza
1	SMA ST PCB-JCK STD SMT	J11	Molex	73251-1350
1	FIXED IND 2.2µH 770mA SMD	L1	Coilcraft	NLCV32T-2R2M-EF
1	FERRITE BEAD 30Ω 3A 0603 1LN	L2	Würth Electronics	742792609
1	FIXED IND 10µH 1.25A 200 m? SMD	L3	Coilcraft	LPS4018-103MRC
1	FERRITE BEAD 120Ω 0603 1LN	L4	Murata Electronics North America	BLM18AG121SN1D
3	LED RED CLEAR 0603 SMD	LD1, LD2, LD3	Würth Elektronik eiSos GmbH	150060RS75000
2	LED GREEN CLEAR 0603 SMD	LD4, LD5	Würth Elektronik eiSos GmbH	150060GS75000
1	WR-WTB 2.00mm TERM HOUSING 3PIN	P1	Würth Electronics	620003113322
1	Printed Circuit Board	PCB1		PCB-180401-01
3	N-Channel 25 V 4 Ohm Surface Mount Digital FET - SOT-23-3	Q1, Q2, Q3	Fairchild Semiconductor	FDV301N
1	RES SMD 52.3kΩ 1% 1/10W 0603	R1	Yageo	RC0603FR-0752K3L
3	RES SMD 10kΩ 1% 1/10W 0603	R2, R5, R24	Yageo	RC0603FR-0710KL
10	RES SMD 0? JUMPER 1/10W 0603, RES SMD 0Ω JUMPER 1/10W 0603	R3, R4, R9, R13, R14, R15, R16, R17, R23, R25	Yageo	RC0603FR-070RL
2	RES SMD 4.7kΩ 1% 1/10W 0603	R6, R7	Yageo	RC0603FR-074K7L
3	RES SMD 2.4kΩ 1% 1/10W 0603	R8, R19, R20	Yageo	RC0603FR-072K4L
3	RES SMD 1MΩ 1% 1/10W 0603	R10, R11, R12	Yageo	RC0603FR-071ML
1	RES 10mΩ 1% 1/2W 0805	R18	Susumu	KRL1220E-M-R010-F-T5
2	RES SMD 3.9kΩ 1% 1/10W 0603, RES SMD 3.9kΩ 1% 1/10W 0603	R21, R32	Yageo	RC0603FR-073K9L
2	RES SMD 100kΩ 1% 1/10W 0603, RES SMD 100kΩ 1% 1/10W 0603	R22, R34	Yageo	RC0603FR-07100KL
4	RES SMD 0Ω JUMPER 1/16W 0402, RES SMD 0Ω JUMPER 1/16W 0402	R26, R27, R28, R29	Yageo	RC0402FR-070RL
2	RES SMD 100Ω 1% 1/10W 0603	R30, R31	Yageo	RC0603FR-07100RL
1	RES SMD 3kΩ 1% 1/10W 0603	R33	Yageo	RC0603FR-073KL
1	RES SMD 1kΩ 1% 1/10W 0603	R35	Yageo	RC0603FR-071KL
1	THERMISTOR NTC 10kΩ 3380K 0603	RT1	Murata	NCU18XH103F60RB
10	48mm x 9.75mm SC	SC1, SC2, SC3, SC4, SC5, SC6, SC7, SC8, SC9, SC10	Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia	SC_0975_4800
1	WS-TASV SMD Tact Switch 6.0X3.8 mm H=2.5mm white	SW1	Würth Elektronik eiSos GmbH & Co.KG	434111025826
1	Converter DC to DC 4.2V to 18V Synchronous Step Down	U1	Diodes Inc.	AP62250WU-7
1	IC REG BCK BST PROG 300mA 20QFN	U2	Analog Devices / Linear Technology	LTC3106EUDC#PBF
1	IC FUEL GAUGE MODELGAUGE 14TDFN	U3	Maxim	MAX17260SETD+
1	IC MCU 32BIT 256KB FLASH 64LQFP	U4	STMicroelectronics	STM32L431RCT6
1	LoRa Module Ism < 1GHZ SMD	U5	RF Solutions	RFM95W-868S2
1	QUECTEL L76-L EXTREMELY COMPACT GNSS MODULE WITH ULTRA LOW POWER CONSUMPTION	U6	Quectel	L76L-M33
1	TPS22917 ULTRA-LOW LEAKAGE LOAD SWITCH, 1V-5.5V, 2A, 80mΩ	U7	Texas Instruments	TPS22917DBVT
1	CRYSTAL 32.7680kHz 6pF SMD	XT1	Abracon LLC	ABS07-120-32.768KHZ-T
1	CRYSTAL 8.0000MHz 18pF SMD	XT2	Abracon LLC	ABMM2-8.000MHZ-E2-T

ANEXO D. CÓDIGO

D.1 Firmware del Nodo

```
1 // Proyecto: TFM - Nodo LoRa PV
2 // Nodo Stage 3
3 // Fecha: 210910
4 // Este nodo envía información de los sensores al servidor y se reconfigura
  cuando recibe nuevos parámetros
5
6 #include <SPI.h>
7 #include <RH_RF95.h>
8 #include <DHT.h>
9 #include <DHT_U.h>
10
11 #define RFM95_CS 10 // Chip select conectado a pin 10
12 #define RFM95_RST 5 // Reset conectado a pin 9
13 #define RFM95_INT 2 // Interrupción conectada a pin 2 (tiene interrupción)
14
15 #define RF95_FREQ 868.0
16
17 RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);
18
19 #define LED 14 // led conectado en pin 13
20 #define DHTPIN 4 // Pin en el que se conecta sensor DHT
21 #define DHTTYPE DHT11 // Tipo de sensor
22 #define LIGHT_PIN 13
23 #define CHARGE_PIN 6
24 #define VBAT_PIN A1
25
26
27 uint8_t mode = 1; // Modo de funcionamiento inicial
28 uint8_t lightstat = 0; // Estado de funcionamiento inicial de la luminaria
29 uint8_t chargestat = 0; // Estado de funcionamiento inicial de la carga
30 int bcnintvl = 5; // Intervalo de balizamiento en segundos
31
32 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
33
34 void setup ()
35 {
36   pinMode(LED, OUTPUT);
37   pinMode(CHARGE_PIN, OUTPUT);
38   pinMode(LIGHT_PIN, OUTPUT);
39   pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
40   digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
41
42   dht.begin();
43
44   Serial.begin(9600);
45   delay(100);
46   Serial.println("# Puerto de serie OK #");
47
48   digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
49   delay(10);
50   digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
51   delay(10);
52
```

```
53   while (!rf95.init()) {
54       Serial.println("la radio LoRa no se ha podido inicializar");
55       delay(500);
56   }
57   Serial.println("# LoRa OK #");
58   if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
59       Serial.println("setFrequency fallido");
60   }
61   Serial.print("Frecuencia ajustada a: "); Serial.println(RF95_FREQ);
62
63   rf95.setTxPower(13, false); // Potencia ajustada a +13 dBm
64 }
65
66 void loop()
67 {
68     float h = dht.readHumidity();
69     float t = dht.readTemperature();
70     if (isnan(h) || isnan(t)) {
71         Serial.println("No se ha podido leer el sensor DHT");
72         return;
73     }
74     // float vbat = 4.15;
75     float vbat = analogRead(VBAT_PIN)*5.0/1024.0; // Tensión de la batería
76     if (vbat >= 4.15){
77
78         chargestat = 0;
79     }
80     if (mode == 1)
81     {
82         uint8_t uh = h;
83         String data = String(h) + " " + String(t) + " " + String(vbat); // Concatenar
84         // Strings con los valores a enviar al servidor
85         int dataLength = data.length(); dataLength++; // Retorna la longitud en
86         // caracteres del string data
87         uint8_t total[dataLength]; // Variable for data to send
88         data.toCharArray(total, dataLength); // Cambia la variable data de string a
89         // chararray
90         rf95.send(total, dataLength);
91         rf95.waitPacketSent();
92         Serial.print("Paquete enviado: ");
93         Serial.println(data);
94
95         if (rf95.waitForPacket(50))
96         {
97             uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN]; // [Array de bytes, longitud máxima
98             // del driver]
99             uint8_t len = sizeof(buf);
100            if (rf95.recv(buf, &len))
101            {
102                digitalWrite(LED, HIGH);
103                if ( (buf [0] == 'A') && (buf [1] == 'C') && (buf [2] == 'K') ){ //
104                // Detectar si el paquete recibido es un ACK
105                Serial.println ("Paquete recibido por el servidor");
106                delay(bcnintvl*1000);
107                return;
108            }
109            }
110            Serial.print("Respuesta recibida: ");
111            Serial.println((char*)buf);
112            Serial.print("RSSI: ");
113            Serial.println(rf95.lastRssi(), DEC);
114            digitalWrite(LED, LOW);

```

```
109
110     // Parte de la luminaria
111
112     lightstat = buf[0]-'0'; // Resta 48 al caracter (ASCII) para obtener un
número
113     Serial.print("Estado de la luminaria: ");
114     Serial.println(lightstat);
115     if (lightstat == 0){
116         digitalWrite(LIGHT_PIN, LOW);
117     }
118     if (lightstat == 1){
119         digitalWrite(LIGHT_PIN, HIGH);
120     }
121     chargestat = buf[1]-'0'; // Resta 48 al caracter (ASCII) para obtener un
número
122     Serial.print("Estado de la carga: ");
123     Serial.println(chargestat);
124     if (chargestat == 0){
125         digitalWrite(CHARGE_PIN, HIGH);
126     }
127     if ((chargestat == 1) && (vbat<4.15)){ // Solo cargar si tensión en la
batería mayor que 4,15V
128         digitalWrite(CHARGE_PIN, LOW);
129     }
130
131     mode = buf[2]-'0'; // a 50 le resta el valor 48
132     if ((mode != 1) && (mode != 2)){
133         Serial.println("Error 1 - Los parámetros introducidos son erróneos");
134         Serial.println("Restaurando valores por defecto");
135         uint8_t data[] = "Error 1 - PARAMETROS ERRONEOS";
136         rf95.send(data, sizeof(data));
137         mode = 1;
138         lightstat = 0;
139         chargestat = 0;
140         bcintvl = 5;
141         Serial.println("# Reiniciando #");
142         delay(5000);
143         return;
144     }
145     else{
146         uint8_t data1[] = "Status 1 - PARAMETROS ACTUALIZADOS";
147         rf95.send(data1, sizeof(data1));
148     }
149
150     Serial.print("Nuevo modo de funcionamiento: ");
151     Serial.println(mode);
152     bcintvl = buf [3] -'0'; //Esto me devolvería el valor ASCII, así que le
resto el 0
153     Serial.print("Intervalo de balizamiento (seg): ");
154     Serial.println(bcintvl);
155     Serial.println("# Reiniciando #");
156     delay (1000);
157     return;
158 }
159 else {
160     Serial.println("recv failed");
161 }
162 }
163 else {
164     Serial.println("Sin respuesta del servidor");
165     delay(bcintvl*1000);
```

```
166     return;
167   }
168 }
169
170 if (mode == 2) {
171   Serial.println("Nodo en modo 2, desactivar luminaria temporalmente");
172   int retardo=bcnintvl*60*1000; // Retardo en minutos
173   Serial.print("Desactivando luminaria durante: ");
174   Serial.print(bcnintvl);
175   Serial.println(" minutos");
176   delay(bcnintvl*60*1000UL);
177 }
178 mode = 1; // Al terminar la espera se revierte al modo 1
179 }
```

D.2 Firmware del Servidor

```
1 // Proyecto: TFM - Nodo LoRa PV
2 // Server Stage 3
3 // Fecha: 210910
4 // Este servidor permanece a la escucha hasta que recibe datos del nodo
  luminaria, después envía una respuesta con los datos introducidos por el
  operador.
5
6 #include <SPI.h>
7 #include <RH_RF95.h>
8
9 #define RFM95_CS 10 // Chip select conectado a pin 10
10 #define RFM95_RST 9 // Reset conectado a pin 9
11 #define RFM95_INT 2 // Interrupción conectada a pin D2 (tiene interrupción INT0)
12
13 #define RF95_FREQ 868.0
14
15 RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);
16
17 #define LED 13 // led conectado en pin 14
18 #define DINSZ 4 // Tamaño de la cadena de parámetros a introducir
19
20 uint8_t flag = 1;
21
22 void setup() {
23   pinMode(LED, OUTPUT);
24   Serial.begin(9600);
25   delay(100);
26   Serial.println("# Puerto de serie OK #");
27
28   digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
29   delay(10);
30   digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
31   delay(10);
32
33   while (!rf95.init()) {
34     Serial.println("La radio LoRa no se ha podido inicializar");
35     delay(500);
36   }
37   Serial.println("# LoRa OK #");
38   if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
```

```
39     Serial.println("setFrequency fallido");
40 }
41 Serial.print("Frecuencia ajustada a: ");
42 Serial.println(RF95_FREQ);
43 Serial.println();
44 rf95.setTxPower(13, false);
45 Serial.println("Server 1 Stage 3 online");
46 }
47
48 void loop()
49 {
50     int timer = millis()/1000;
51     timer = (millis()/1000 - timer);
52     char datain_ser[DINSZ+1];
53     if (flag==1) {
54         Serial.println("Introduzca datos de funcionamiento");
55         flag = 0;
56     }
57
58     while (Serial.available()<(DINSZ+1) && (millis()/1000-timer)<3 ){}
59     if ((millis()/1000-timer)==3){
60         (Serial.println("Tiempo excedido"));
61     }
62     Serial.println();
63     if (Serial.available()==(DINSZ+1)){
64         Serial.println("Se han introducido nuevos parámetros");
65         for(int n=0; n<DINSZ; n++){
66             datain_ser[n] = Serial.read();
67         }
68         datain_ser[DINSZ]='\0';
69         Serial.println(datain_ser);
70         flag = 1; // Se han introducido nuevos parámetros
71         delay (10);
72         while (Serial.available()>0){ // Borrar buffer del puerto de serie
73             int clear = Serial.read();
74             delay (10);
75         }
76     }
77     else{
78         Serial.println ("No se ha introducido ningún parámetro");
79     }
80
81     while (!rf95.available()){ // Etapa de espera hasta que haya un mensaje
82         if (rf95.waitForAvailable(3000)){
83             uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
84             uint8_t len = sizeof(buf);
85             if (rf95.recv(buf, &len){
86                 digitalWrite(LED, HIGH);
87                 if ((buf[0] == 'E' ) && (buf[1] == 'r')){
88                     Serial.println();
89                     Serial.println((char*)buf);
90                     delay (10000);
91                     return;
92                 }
93                 while(flag){
94                     uint8_t i=0;
95                     rf95.send(datain_ser, sizeof(datain_ser)); // Envía array data
96                     rf95.waitForPacketSent();
97                     Serial.println("Parámetros enviados al cliente: ");
98                     Serial.println(datain_ser);
```

```
99     if ((buf[0] == 'E' ) && (buf[1] == 'r')){ // Detectar error en los
parámetros enviados
100         Serial.println();
101         Serial.println((char*)buf);           // Envía al puerto de serie el error
recibido
102         delay (10000);
103         return;
104     }
105     while (!rf95.available()){ }             // Detenerse hasta que haya un
mensaje
106     while (rf95.recv(buf, &len) && i<6){
107         // Serial.println("Recibiendo dentro del bucle"); //Debug
108
109         if ((buf[0] != 'E') && (buf[0] != 'S')){ // Detectar que el mensaje no
es error ni status
110             Serial.println("No se recibe E ni S"); // Debug
111             i++;
112             Serial.println(i);               // Debug
113         }
114         else{
115             Serial.println("Se ha recibido E o S");
116             Serial.println((char*)buf);
117             Serial.println();
118             return;
119         }
120         while (!rf95.available()){
121         }
122     }
123 }
124
125 // Enviar respuesta
126 delay(20); // Esto da tiempo al otro código para que corra
127 if(!flag){ // Si no se introducen parámetros se presentan los datos del
sensor y se da el ACK
128     Serial.print("Datos sensor: ");
129     Serial.println((char*)buf);
130     Serial.print("RSSI: ");
131     Serial.println(rf95.lastRssi(), DEC);
132     uint8_t data[] = "ACK";
133     rf95.send(data, sizeof(data)); // Envía array data
134     rf95.waitPacketSent();
135 }
136 digitalWrite(LED, LOW);
137 }
138 else
139 {
140     Serial.println("recv failed");
141 }
142 }
143 }
```

ANEXO E. CÁLCULOS

E.1 Cálculo del consumo máximo del circuito integrado LTC3106

Como tiene que cumplirse los balances de energía, asumiendo rendimiento del LTC3106 en un 90% cuando la tensión de entrada es de 4.6V (Linear Technology, 2015)

$$I_{in}V_{in} = \frac{(I_{load}V_{load} + I_{bat}V_{bat})}{\eta}$$

Donde I_{in} es la corriente de entrada a tensión V_{in} al LTC3106, I_{load} es la corriente de salida del convertidor consumida por la carga a tensión V_{load} e I_{bat} es la corriente de carga de la batería que se carga a tensión de V_{bat}

Se considera en 4.6 V la tensión de entrada del LTC3106, mientras que las corrientes de consumo del dispositivo y carga de la batería se estiman en 100mA a una tensión de 3.3 y 4.2 V respectivamente. Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior y despejando se obtiene que I_{in} del LTC3106 tiene un valor de 185 mA.

E.2 Cálculo de la corriente de inductor del convertidor de tensión AP62250

Según la ecuación 10 del *datasheet* (Diodes Incorporated, 2021), la intensidad pico del inductor puede calcularse como:

$$I_{LPEAK} = I_{LOAD} + \frac{\Delta I_L}{2}$$

Donde I_{LPEAK} es la intensidad de pico en la bobina, I_{LOAD} es la intensidad de la carga y ΔI_L es la corriente de rizado; 750mA si se considera un 30% de la corriente de carga máxima (2,5A).

Con estos valores y sabiendo que la intensidad de la carga de este convertidor es la misma que la de entrada al integrado LTC3106 calculada en el apartado E.1 el valor de I_{LPEAK} resulta 560mA.

E.3 Cálculo de las resistencias de ajuste de tensión de entrada mínima al integrado LTC3106

La tensión de entrada para la cual arranca el convertidor LTC3106 y empieza a consumir energía del módulo fotovoltaico puede calcularse como:

$$V_{IN(TURNON)} = 0.6V \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

Existe una histéresis en el funcionamiento del integrado, este deja de consumir energía de los paneles según la siguiente ecuación:

$$V_{IN(TURNOFF)} = 0.5V \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

Para que se produzca el arranque del convertidor con una tensión de 1.2V las resistencias R1 y R2 deben tener el mismo valor. Fijando un valor de 1 MΩ para la resistencia R1, R2 resulta del mismo valor.

E.4 Cálculo de las dimensiones de las guías de onda coplanar

La impedancia característica de una línea de transmisión de una guía de onda coplanar puede calcularse como (C. Wadell, 1991):

$$Z_0 = \frac{60.0 \pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{1.0}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}}$$

Donde los términos K Y ϵ_{eff} son:

$$k = a / b$$

$$k' = \sqrt{1.0 - k^2}$$

$$k_1' = \sqrt{1.0 - k_1^2}$$

$$k_1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi a}{4.0 h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi b}{4.0 h}\right)}$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{1.0 + \epsilon_r \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}{1.0 + \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}}$$

Puesto que se desean conocer los parámetros a y b en función de una impedancia característica definida previamente ($Z_0 = 50 \Omega$), el cálculo de estos valores no resulta directo. Sin embargo, existe software específico que facilita la tarea del cálculo de este tipo de guías de onda. Su uso está extendido, ya que se trata de un procedimiento habitual cuando se diseñan circuitos impresos de radiofrecuencia.

Un ejemplo de este tipo de software es TX-LINE de AWR. Este programa permite el cálculo de un gran número de tipologías de líneas de transmisión y es el que se utiliza para el cálculo de las dimensiones de las guías de onda de los sistemas de comunicaciones y geoposicionamiento.

Para ello, se introducen los parámetros del circuito impreso mencionados en el apartado 2.5.7 (ϵ_r , Dk , h y t) y se fija una anchura de pista a de 0.86 mm. Con ello se obtiene que la distancia

desde la pista hasta el plano de masa adyacente, $G = 0.1447$ mm. La separación entre planos b mencionada en el apartado 2.5.7 guarda relación con la separación entre pista y plano adyacente G , ya que $b = a + 2G$.

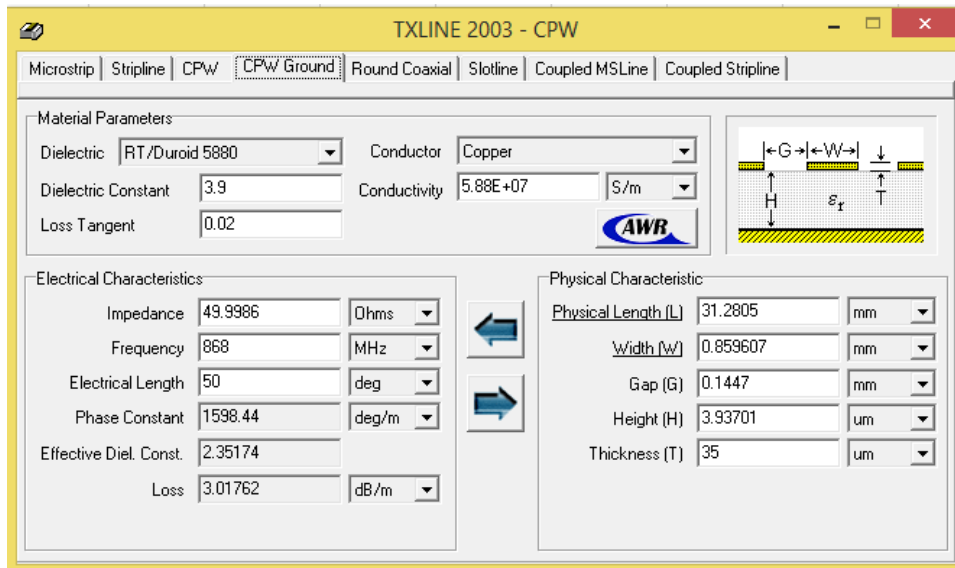


Figura 65. Cálculo de dimensiones de la línea de transmisión del sistema de comunicaciones (Elaboración propia).

Para el cálculo de la línea de transmisión del módulo de geolocalización se procede de manera análoga. En este caso varía la frecuencia a transmitir, que es de 1575 MHz.

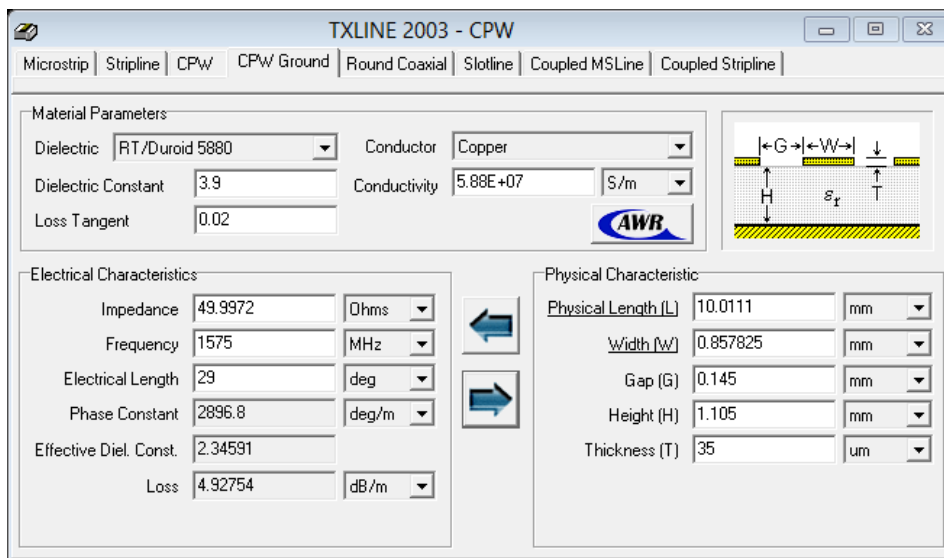


Figura 66. Cálculo de dimensiones de la línea de transmisión del sistema de Geoposicionamiento (Elaboración propia).