

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Diseño de Sistema de Telemedición de Ruido Ambiental con Tecnología IoT parcialmente autónomo para su incorporación en farolas de alumbrado público.

AUTOR: MIGUEL JARAMILLO ROSADO

Cádiz, Abril 2020

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL.

Diseño de Sistema de Telemedición de Ruido Ambiental con Tecnología IoT parcialmente autónomo para su incorporación en farolas de alumbrado público.

Director: PROF. DR. DIEGO SALES LÉRIDA

Autor: MIGUEL JARAMILLO ROSADO

Cádiz, Abril 2020

Querría tomarme la libertad de utilizar esta hoja vacía para dedicarle unas palabras a aquellos/as que me han acompañado por este camino:

En primer lugar, a mi familia. Mis padres y abuelos especialmente, los que más me conocen y han estado conmigo durante este (a veces demasiado sinuoso) camino. Los que nunca han rechazado una llamada ni en las peores circunstancias. Los que siempre me han tenido en cuenta aún ahora que no puedo estar con ellos. La voz de la cordura y la sabiduría. Siento que todo lo que diga es poco para agradecerlos. Sois lo más importante para mí. Os quiero.

A mis amigos, por escucharme y entenderme siempre. Sois una extensión de mí. Siempre habéis estado y siempre estaré. La caña que nos vamos a tomar cuando se termine todo esto va a ser para el recuerdo. Quiero mencionar a Alvaro y Javi, mis compañeros de vida durante estos años, y este año especialmente. Sin vosotros no hubiera sido lo mismo. Las risas no están pagadas, de verdad que no.

Hablando de amigos, no me puedo olvidar de vosotros, Roberto y Víctor. Dentro y fuera de la Escuela. Estos años estando juntos dieron para miles de ideas y planes. Mis chavales del C11. Adelante, Sileven.

Por todo esto y mucho más, dicen que quien tiene un amigo tiene un tesoro, yo pienso que vosotros valéis más aún.

Por supuesto, no me puedo olvidar de ella...mi chica. La que me ha aguantado en los peores momentos y la que siempre ha estado ahí, pase lo que pase, luchando conmigo. Te debo muchísimo, y te quiero más aún.

Por último, no puedo olvidarme de los profesores de la Escuela a los que he tenido el placer de conocer. De todos y cada uno de vosotros he podido aprender y seguir progresando. Quiero mencionar personalmente a José María Guerrero, Diego Sales y Angel Quirós. Las tres personas que más influencia han tenido en mí y en mi forma de entender este mundo. Gracias Jose María, por ser como un padre para mí en la Escuela, por aconsejarme y orientarme, por contagiarme siempre de tu pasión por la electrónica. Siempre he recurrido a ti cuando he estado perdido, y siempre me has ayudado. No me puedo olvidar de invitarte a un café la próxima vez que nos veamos. Eres el mejor.

Millones de gracias a Diego, tutor de este trabajo, y tutor laboral también. Todo lo que he aprendido al trabajar contigo de las dos formas es impresionante. Te he dado mucho trabajo, y el que hayas estado ahí te lo agradeceré siempre.

No me puedo olvidar de Angel, sabiduría pura. Te he admirado como profesor y como persona. Hablar contigo es pensar que uno nunca va a llegar a saber tanto. Llegar a la clase con ansias por empezar y seguir aprendiendo. Gracias por enseñarme tantísimo.

Contenido

INDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	7
1. INTRODUCCION	8
1.1. Antecedentes	9
1.2 Alcance y Objetivos	11
1.3 Justificación.....	12
1.4 Parámetros de medida de ruido ambiente.....	14
2. MATERIALES Y MÉTODOS	16
2.1 IDE de Arduino (Integrated Development Environment).....	16
2.2 SAMD21	17
2.3 Sensor empleado	20
2.3.1 Protocolo I ² S	22
2.3.2 Parámetros de elección del sensor.....	25
2.3.3 Elección del sensor.....	30
2.4 Módulo de comunicación	33
2.4.1 SigFox	33
2.4.1.1 Contexto dentro del proyecto	33
2.4.1.2 Funcionamiento.....	34
2.4.1.3 Backend de SigFox.....	35
2.4.2 Módulos integrados de comunicación.....	37
2.4.3 Elección del TD1208r de TD Next.....	37
2.4.3.1 Características generales del TD1208r.....	39
2.5 Pantalla.....	40
2.5.1 Requisitos del sistema	40
2.5.2 Elección del display	42
2.6 Software de diseño de PCB.....	42
2.7 Horno de soldadura para componentes SMD.....	43

2.8 Hojas de características de componentes	45
2.8.1 Etapa de alimentación y almacenamiento de energía.....	45
2.8.2 Conectores.....	48
2.8.3 Caja IP67	50
2.9 Normativa para medidas de parámetros de ruido ambiental	51
 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	54
 3.1 Introducción al Sistema.....	54
3.2 Desarrollo del programa en entorno Arduino.....	54
3.2.1 Estructura y funcionalidad	55
3.3 Diseño del sistema de telemedición de ruido ambiente	56
3.3.1 Placa específica para el sensor	57
3.3.2 Etapa de recepción-envío de datos y control.....	57
3.3.3 Etapa de potencia y alimentación.....	63
3.3.3.1 Cálculos y requisitos de energía.....	65
3.3.3.2 Diseño de la etapa de potencia	79
3.4 Consideraciones del esquemático.....	89
3.5 Diseño final para fabricación	90
 4. FABRICACIÓN Y COSTES DEL DISPOSITIVO.....	93
 4.1 Lista de componentes	93
4.2 Modelo de fabricación del prototipo electrónico	96
4.2.1 Consideraciones en el diseño de la PCB	96
4.2.2 Archivos generados.....	98
4.3 Presupuesto de fabricación de PCBs	99
4.3.1 Fabricantes	101
4.4 Etapa de montaje de las PCBs.....	106
4.5 Modelos físicos de los componentes del sistema.	107
4.5.1 Conectores externos	107
4.5.2 FUSION 360	113
4.5.3 PCBs.....	114
4.5.4 Soporte físico	115
4.5.5 Probeta del sensor.....	117

4.6 Despiece del dispositivo y montaje final.....	126
4.7 Presupuesto total	129
5. RESULTADOS	133
6. CONCLUSIONES	133
7. BIBLIOGRAFÍA.....	135
8. ANEXO A:.....	139
9. ANEXO B:	144
10. ANEXO C:	147
11. ANEXO D:.....	149
12. ANEXO E:	153
13. ANEXO F:	157

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Concepto de conexión de Internet of Things (IoT).....	8
Figura 2. Aplicación de uso de ECOBICI.....	10
Figura 3. Sistema actual de telemedición de ruido ambiente	10
Figura 4. Escala de ruido (en decibelios)	13
Figura 6. Ejemplo de uso de la nomenclatura con ponderación de frecuencias.....	15
Figura 7. Comparación entre SPL, Leq y SEL.....	15
Figura 8. Pantalla de inicio del IDE de Arduino	16
Figura 9. Comparación entre SAMD21g18 y ATmega328P (Fuente https://medium.com/).....	18
Figura 10. Composición de un micrófono de condensador Electret.:	21
Figura 11. Composición de un sensor de ruido MEMS completo	21
Figura 12. Esquema de funcionamiento del protocolo I2S	23
Figura 13. Esquema temporal de las señales del protocolo I2S	24
Figura 14. Diagrama polar de direccionalidad	26
Figura 15. Respuesta en frecuencia del sensor comercial ICS-43432.....	26
Figura 16. Redes de comunicación para IoT. Fuente (https://www.haxiot.com/).....	34
Figura 17. Principio de funcionamiento de la red SigFox.....	35
Figura 18. Página web del Backend	36
Figura 19. Condición de envío de Downlink	36
Figura 20. Tabla comparativa de la familia de módems de TD Next.....	38
Figura 21. Diagrama de bloques del TD1208r (Fuente: datasheet del TD1208r)	40
Figura 22 Panel OLED usado en el sistema	42
Figura 23. Pantalla de inicio del Software CAD Eagle v9.5.2	43
Figura 24. Horno de soldadura T-962 (Fuente: http://www.smtnet.com/).....	44
Figura 25. MCP73831(izquierda) y TCP6300 (derecha)).....	46
Figura 26. Conector JST de Amphenol para comunicar el sensor con la PCB principal	49
Figura 27. Conector de 10 pines para el depurador.....	50
Figura 28. Plano de la caja IP67.....	50

Figura 29. Diagrama representativo del sistema	54
Figura 30. Representación de las conexiones de la PCB específica del micrófono	57
Figura 31. Elementos principales de la PCB de comunicación.....	58
Figura 32. Conexiones de alimentación y RESET en el SAMD21G	61
Figura 33. Conexiones de alimentación y auxiliares del TD1208r	62
Figura 34. Esquema de funcionamiento de la etapa de carga y alimentación.	64
Figura 35. Desglose de los periféricos con su consumo nominal asociado)	66
Figura 36. Datos del Instituto Geográfico Nacional.....	70
Figura 37. Pruebas de carga y descarga para ver las variaciones en el ciclo de vida de un modelo de batería.	72
Figura 38. Modelo de circuito equivalente de batería	73
Figura 39. Diferentes modelos de batería partiendo de los datos principales	75
Figura 41. Datos obtenidos de simular para la corriente máxima de demanda	78
Figura 42. Ejemplo de curva de carga de batería de ión-litio.....	79
Figura 43. Conexiones básicas del regulador de carga	80
Figura 44. Monitoreo y comparación de la tensión de la batería	81
Figura 45. Conexión final del pin PROG	82
Figura 46. Conexiones del selector de alimentación.....	84
Figura 47. Conexiones del convertidor de tensión	87
Figura 49. Caras top (a)) y bottom (b)) de la PCB del sensor	92
Figura 50. Archivos generados para la fabricación de la PCB.....	98
Figura 51. Visualización de las capas de las PCBs por parte de los fabricantes a partir de los archivos Gerber.	99
Figura 52. DRC de 2CISA	102
Figura 53. DRC de Eurocircuits.....	103
Figura 54. DRC del fabricante JLCPCB	104
Figura 55. Imagen (a)) y planos (b)) del PX0412	108
Figura 56. Planos e imagen del PX0410	109
Figura 57. Ensamblaje de los conectores PX0410/12	110
Figura 58. Planos e imagen del PX0447	111

Figura 59. Planos e imagen del PX0441	112
Figura 60. Planos e imagen del PX0409	113
Figura 61. Planos e imagen del PX0414	113
Figura 62. Diseño 3D de las PCBs que componen el sistema.....	115
Figura 63. Modelo 3D de la caja IP67 en Fusion360.....	116
Figura 64. Dimensiones de la pantalla	116
Figura 65. Posicionamiento de la batería en la caja	117
Figura 66. Angulos y medidas del perfil del soporte.	119
Figura 67. Modelo en 3D de las partes de la probeta para el sensor.	122
Figura 68. Ensamblaje de la probeta	1254
Figura 69. Mallado de las piezas del modelo para su posterior impresión.....	125
Figura 70. Imagen del soporte para la PCB del sensor en MeshMixer.	126
Figura 71. Situación de la PCB y conectores dentro de la caja.....	127
Figura 72. Inclusión de los soportes junto con la PCB y la pantalla	128
Figura 73. Diseño final del modelo y detalles interiores de la caja.....	128
Figura 74. Batería ICR18650 de Samsung.....	131
Figura 75. Propiedades de los componentes de la probeta.....	131

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de precios de diferentes alternativas	20
Tabla 2. Valores recomendados de los parámetros de los micrófonos MEMS	29
Tabla 3. Comparativa de sensores comerciales.....	31
Tabla 4. Leyenda de la tabla de características de los módulos TD120Xr.....	38
Tabla 5. Propiedades principales del MCP73831	46
Tabla 6. Propiedades principales del TCP63001.....	48
Tabla 7. Características principales del cristal de cuarzo.....	59
Tabla 8. Consumos de elementos secundarios del sistema	68
Tabla 9. Parámetros de las ecuaciones que modelan una batería	74
Tabla 10. Modos de funcionamiento del TPS2113	85
Tabla 11. Lista de Componentes	96
Tabla 12. Comparativa de precios entre fabricantes	106
Tabla 13. Antenas de Bulgin.....	112
Tabla 14. Presupuesto del soporte físico del sistema	130
Tabla 15. Desglose de costes del sistema.....	132

1. INTRODUCCION

Hoy en día, las tecnologías de comunicación son un elemento cotidiano en la vida de las personas. No es algo exclusivo de la industria, ni de las empresas dedicadas a ello. Es transparente, y ya se ha convertido en indispensable para el día a día. Desde los años 60 con la llegada de Internet, el foco se puso en conectar a todo el mundo. Y se podría decir que se ha conseguido. Sin embargo, desde hace pocos años, el objetivo ha cambiado. Ya no se trata únicamente de conectar a las personas, sino conectar aquello que les rodea. La comunicación no tiene que ser exclusivamente entre seres humanos, puede ser entre los objetos y los sistemas que nos rodean día a día. Es lo que se conoce como *The Internet of Things* (IoT). De esta forma, las posibilidades se multiplican: acceso a datos, servicios específicos en la educación, seguridad, asistencia sanitaria, transporte, automatización, monitoreo de diferentes parámetros de un entorno, etc. Todo ello permite generar gran cantidad de datos del mundo físico, los que, luego de ser analizados con herramientas informáticas, pueden ser útiles en la toma de decisiones en diversos ámbitos. En ocasiones, pueden llegar a mejorar actividades cotidianas o alertar de algún suceso de manera inmediata, al contar con información valiosa en tiempo real. [1]



Figura 1. Concepto de conexión de Internet of Things (IoT)

Las aplicaciones son ilimitadas. Cabe destacar que las recientes investigaciones en relación a la tecnología 5G tienen como uno de sus principales objetivos el aumento del número y de la calidad de las comunicaciones en el ámbito del IoT.

Este proyecto se centra en ofrecer una solución para el monitoreo de un parámetro básico del bienestar en el entorno urbano: el ruido ambiental. El estudio y control del ruido desde un punto de vista medioambiental tiene sentido en cuanto a su utilidad para alcanzar un cierto nivel de protección de la calidad del ambiente sonoro. [2]

Aunque la percepción de molestia hacia un ruido tiene un componente de subjetividad, sí que existen parámetros cuantitativos que tienen relación con una mayor o menor sensación de molestia. Uno de ellos es la energía sonora, directamente relacionado con el nivel de presión sonora que existe en el ambiente. Estos niveles pueden llegar a causar daños irreversibles en el oído cuando un individuo se expone a ellos durante un tiempo prolongado. De hecho, existen reportes de casos donde la exposición a ruido ambiente por encima de valores recomendables (como pudiera ser el tráfico rodante) produce trastornos más graves como puede ser el insomnio.

El sistema propuesto será capaz de medir este parámetro y comunicarse a través de una red IoT para poder acceder a él en tiempo real. Esta comunicación se realiza en banda estrecha (Narrow Band), esto es, mediante paquetes de datos de unos pocos de Bytes, lo que permite el intercambio de información con menor potencia que los protocolos de comunicación tradicionales, como por ejemplo el GPRS, usado en redes móviles de compañías telefónicas. De esta forma, también se cumple con uno de los objetivos primordiales dentro del marco europeo como es la eficiencia energética, ya que la reducción del consumo energético para conseguir la transmisión es notable.

1.1. Antecedentes

El sistema que se va a diseñar y desarrollar en el presente trabajo tiene como antecedentes un sistema de telemedición de ruido ambiental desarrollado por equipo investigador de la Universidad de Cádiz a través del conocimiento adquirido en diversos proyectos, entre ellos, el proyecto de I+D+i KERSBIKE/ECOBICI, concedido por la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía (convocatoria 2012 de proyectos de I+D+i cofinanciados con FEDER). El proyecto consistió en el despliegue de una red de sensores

para medir los parámetros medioambientales mediante el diseño y desarrollo de dispositivos incorporados en bicicletas. De esta manera se proporciona información en tiempo real sobre el estado de salud ambiental de las rutas usadas por los ciclistas con solo disponer de la aplicación en su Smartphone.

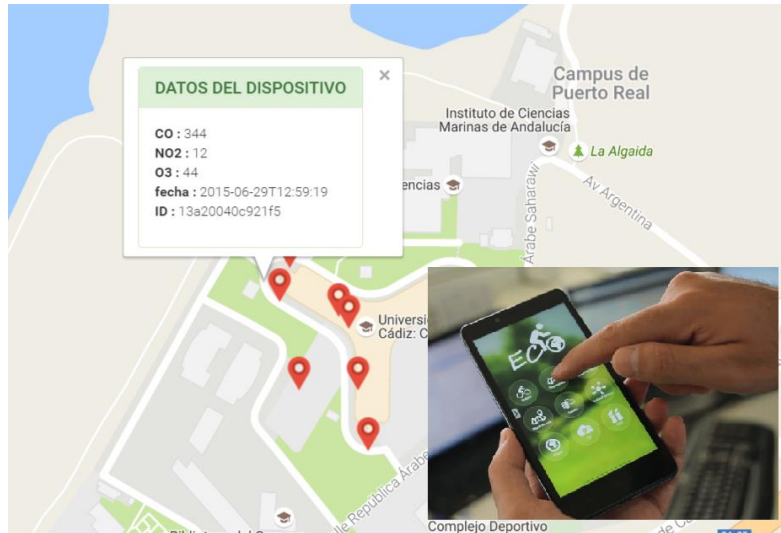


Figura 2. Aplicación de uso de ECOBICI
(fuente: <http://www.smartds.es/productos-y-servicios/>)

Otro de dichos proyectos fue el de investigación UCA con título “Desarrollo de un prototipo multisensor smart universal para vigilancia y calidad ambiental”, además de la dedicación para el avance tecnológico y la instalación de diversas plantas piloto por parte del Dr. Diego Sales Lériida, en su día con la creación de la empresa autónoma SMARTDS y ahora como profesor de la Universidad de Cádiz a través de contratos OTRI.



Figura 3. Sistema actual de telemedición de ruido ambiente

Uno de los prototipos creado por el Profesor Sales fue el de un Sistema de telemedición de ruido ambiental implantado en los municipios de Córdoba y Conil con períodos de 3 meses y 2 años respectivamente. Dada la excelente respuesta de dicho sistema en las distintas plantas piloto, se pretende mejorarlo con un diseño ad-hoc para su inserción en una caja de uso general con protecciones IP-67 y dotarla de autonomía energética con la intención de hacerla autosuficiente en su implantación en farolas del alumbrado público.

1.2 Alcance y Objetivos

Los objetivos principales del trabajo se resumen en los siguientes puntos:

1. Diseño de la placa de tele-medición de ruido ambiental con autonomía energética mediante batería.
2. Realizar mejoras a nivel hardware
3. Mejora y evolución del código del microcontrolador.
4. Diseño de la carcasa y del sistema de sujeción del sensor
5. Elaboración del estudio económico para la fabricación del prototipo a baja escala y redacción del modus operandi para proceder a realizar el pedido del mismo.

Así pues, el objetivo fundamental del TFG será proceder al diseño de una solución integrada de un sistema que actualmente está conformado de forma distribuida. Además de ello, se pretende que esta nueva versión tenga capacidad de autoabastecerse energéticamente durante buena parte del día y disponga de una pantalla o display para mostrar información en tiempo real.

Para ello, será necesario diseñar la etapa de alimentación, conversión de potencia y de regulación de carga de las baterías. Como parte del trabajo se evolucionará el programa en entorno Arduino con las funciones relacionadas con transmisión, captura de datos y data logger (almacenamiento de datos).

El monitoreo y control del dispositivo a distancia se hará mediante el uso de la tecnología *SigFox*, que cuenta con una red IoT de gran cobertura en todo el país, que permite la conexión entre dispositivos con gran estabilidad y bajo consumo energético, totalmente independiente de las redes GSM/3G/4G de las compañías. Se utiliza principalmente para comunicaciones M2M (*Machine to Machine*) que requieran una conexión estable y una tasa de tráfico de datos pequeña.

Es por ello por lo que esta red es la elegida para las tareas del proyecto. Además, dispone de un servicio Cloud que es accesible mediante una API web (*Backend de Sigfox*) y que permite en tiempo real enviar y recibir datos del dispositivo e incluso realizar configuraciones.

Esta red reúne los requisitos fundamentales que se buscan.

Para cumplir los objetivos propuestos se realizó el trabajo que se detalla a continuación:

- Evolución del programa en entorno Arduino.
- Búsqueda y elección de reguladores de carga de baterías y convertidores DC/DC.
- Diseño de la etapa de regulación para la carga y protección de la batería atendiendo a sus niveles
- Diseño de la etapa de conversión de potencia para la adaptación de tensiones a los distintos componentes existentes en el circuito.
- Diseño del circuito mediante software de diseño de PCB que integra etapa de potencia, control, regulación de carga de batería, detección de energía externa y pinyado para la conexión del sensor de ruido en una placa independiente.

La etapa final del proyecto consistirá en el diseño y modelaje de la estructura física del dispositivo, además del estudio económico para la fabricación y montaje del dispositivo a pequeña escala, ofreciendo los correspondientes presupuestos.

1.3 Justificación

El ruido ambiente es un factor clave en el bienestar, pudiendo llegar a afectar significativamente la calidad de vida de muchas personas. Desde siempre ha existido la percepción de que el ruido causa molestia, e incluso en 2011 la OMS (Organización Mundial de la Salud) declaró que las molestias del ruido son el principal efecto adverso sobre la salud de la población. [3] La problemática es aún mayor cuando se estima que cerca de un tercio de la población mundial padece de algún grado de sordera o pérdida auditiva causada por exposición a sonidos de elevada intensidad

Sin embargo, siempre ha existido cierta asunción de que el ruido es algo natural y no se puede combatir contra él. Personas expuestas constantemente a este hecho acaban por

aprender a convivir con él. De hecho, los principales focos de ruido se deben a la actividad humana: el transporte, la construcción, la actividad industrial, comercial y de servicios, las sirenas y alarmas o las actividades recreativas. También se emite por la propia concentración de las personas en sus actividades comunitarias, escolares, laborales y festivas, las cuales derivan en lo que se designa como “contaminación acústica urbana”

140 dB	Disparo de escopeta / Umbral de dolor
130 dB	Avión despegando / fuegos artificiales
120 dB	Motor de avión / martillo neumático
110 dB	Concierto de rock
100 dB	Taladro
90 dB	Atasco de tráfico en una ciudad
80 dB	Tren / secador de pelo
70 dB	Tráfico tranquilo / aspiradora
60 dB	Conversación normal
50 dB	Sonido ambiental en una oficina
40 dB	Conversación susurrada / lluvia
30 dB	Sonido ambiental en el campo
20 dB	Estudio de grabación vacío
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Umbral de audición normal

Figura 4. Escala de ruido (en decibelios)(Fuente: <https://www.audiovisualstudio.es/>)

Tal y como se puede ver en la Figura 4, muchas de las situaciones del día a día se corresponden con niveles de ruido altos, subir el tono de voz, el tráfico, etc. Es por ello que, resultaría de gran interés medir este parámetro en urbes de forma extendida y si es posible, con el menor coste de contaminación posible, tanto visual como energético. Esto permitiría, como se ha comentado en ocasiones anteriores realizar tomas de decisiones con fundamento.

En términos técnicos en cuanto a la medición de ruido ambiental, es importante resaltar que la presión estática del aire es de $10^5 Pa$. Sin embargo, las variaciones de presión sonora audibles son muy pequeñas, del orden de $2 * 10^{-5} Pa$, pudiendo llegar incluso a valores de hasta $100 Pa$. Este valor es conocido como umbral del dolor debido a los daños que puede causar al oído una exposición a tal magnitud. Como se puede intuir, expresar

de forma absoluta dicha presión implica usar valores muy grandes en referencia a la presión mínima audible. Para ello existe una notación que se detallará a continuación.

1.4 Parámetros de medida de ruido ambiente

El oído humano no responde ante los estímulos externos de forma lineal. De hecho, se asemeja más a una forma logarítmica. Es por ello que, para expresar los niveles de ruido, se emplea la unidad decibélica. La magnitud que define la presión sonora con respecto a la presión mínima audible (2×10^{-5}) se conoce como Nivel de Presión Sonora:

- **Nivel de presión sonora, SPL:** Se define como $SPL = 20 * \log(\frac{P}{P_0})$, donde $P_0 = 2 \times 10^{-5} Pa$ (Presión de referencia) y P es la presión eficaz respecto a la de referencia.

Además de calcular el valor de presión, para saber qué cantidad de molestia provoca un ruido, se trabaja con tablas de ponderación como la mostrada a continuación.

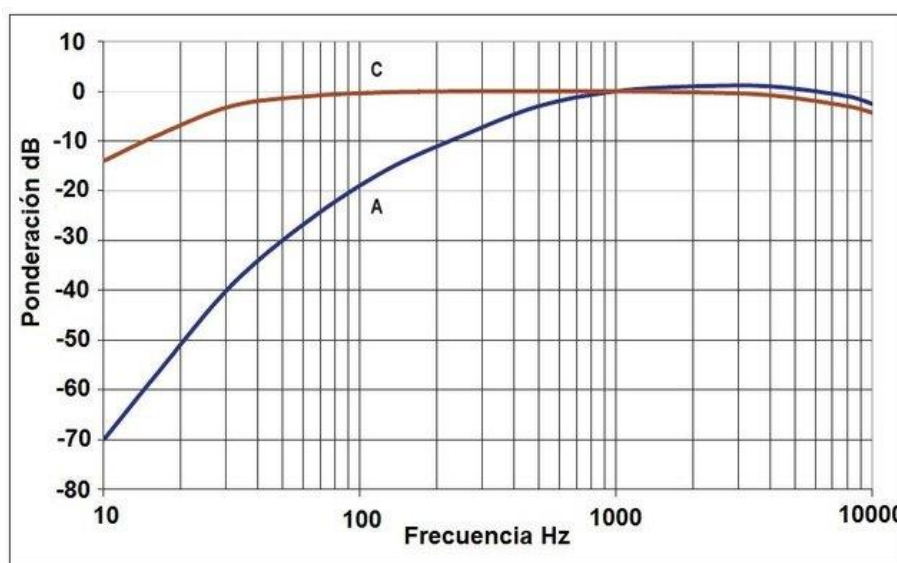


Figura 5. Tabla de ponderación de ruido

Estas tablas funcionan como filtros para algunas bandas de frecuencia. Por ejemplo, el oído humano es capaz de percibir mejor las frecuencias comprendidas entre 500Hz y 6KHz. Como es posible observar en la Figura 5, la ponderación 'A' es la que se adecúa a este hecho y se mide en dBA. Hay multitud de ponderaciones distintas y las medidas suelen ir acompañada de la letra referencia a cada una de ellas. Así pues, aquellas mediciones que se basen en la ponderación 'C' tendrán como unidad 'dBC' o 'dB(C)'.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
PERFORMANCE						
Directionality			Omni			
Sensitivity	1 kHz, 94 dB SPL	-27	-26	-25	dB FS	
Signal-to-Noise Ratio (SNR)			65		dBA	
Equivalent Input Noise (EIN)			29		dBA SPL	

Figura 6. Ejemplo de uso de la nomenclatura con ponderación de frecuencias. Extraída del datasheet del sensor ICS-43432

Las ponderaciones se definen en diferentes normativas. Por ejemplo, las ponderaciones de frecuencias que se usan para sonómetros están definidas en la IEC 61672:2003

El Nivel de Presión Sonora con la ponderación ‘A’ es el parámetro referencia de la mayoría de los sonómetros y sensores de ruido.

A partir de este parámetro se definen otros indicadores como, por ejemplo: el Nivel de presión sonora continuo equivalente (Leq , T), el Nivel de exposición de sonido (SEL) o el Nivel equivalente Dia-Noche (LDN) (Recogido en la Directiva 2002/49/CE y el Real Decreto 1513/2005 por el que se transpone)

El Leq se encarga de medir la energía que promedia el ruido en un intervalo de tiempo, T . Es decir, ofrece un valor calculado con la misma energía que el ruido medido durante un tiempo definido. Es el equivalente al valor eficaz hablando de señales eléctricas. Por otro lado, el SEL es una particularidad de Leq para 1 segundo de duración.



Figura 7. Comparación entre SPL, Leq y SEL

Queda clara la importancia que tiene ser capaces de monitorear este fenómeno y, además, hacerlo de forma correcta requiere de instrumentación adecuada como la que se detallará más adelante.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 IDE de Arduino (*Integrated Development Environment*)

El microprocesador que se va a usar en el sistema (SAM21G [4]) permite la utilización de un entorno de programación ampliamente conocido y utilizado como es el IDE de Arduino. Un IDE es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y una interfaz gráfica (GUI). Además, en el caso de Arduino incorpora las herramientas para cargar el programa ya compilado en la memoria flash del hardware que se va a programar.

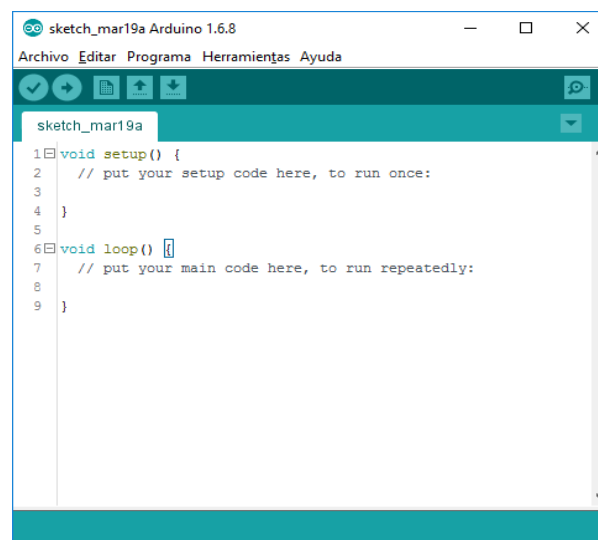


Figura 8. Pantalla de inicio del IDE de Arduino

Este entorno está escrito en Java y tiene la principal ventaja de que es multiplataforma y de licencia libre. (<https://www.arduino.cc/en/main/software>). Además, está basado en los entornos de los lenguajes de programación *Processing* y *Wiring*.

Debido a ello, permite implementar multitud de funciones y programas escritos en C/C++ enfocándose a la programación de microcontroladores. El programa ofrece una

API (*Application Program Interface*) en la que se trabaja con lenguaje de alto nivel (permite el uso de librerías y estructuras de programa complejas basadas en lenguaje C). Tal y como se puede ver en la figura 8, los programas desarrollados en esta herramienta se estructuran en dos bloques:

- **setup ()**: esta función se ejecuta en una única ocasión: cuando se reinicia el sistema. Los reinicios ocurren cuando se reinicia el microcontrolador, cuando se activa el Reset o se conecta la placa a alimentación externa cuando ésta esté apagada. En él se determina la configuración inicial del microcontrolador a programar y se produce la llamada a funciones desarrolladas por el usuario que se requieran ejecutar una única vez al inicio.
- **loop ()**: esta función representa el cuerpo principal, ejecutado de forma repetitiva hasta que la placa es desconectada. Contiene el código que va a implementar el funcionamiento principal de la aplicación a la que vaya dirigida.

Resulta interesante mencionar que, al ser un software libre, tiene un gran respaldo de diferentes comunidades online de Software, como por ejemplo la famosa Github (<https://github.com/arduino/Arduino>), Reddit (<https://www.reddit.com/r/arduino/>) o Arduino Forum (<https://forum.arduino.cc/>). Todo este apoyo por parte de la comunidad permite que se desarrollen multitud de funciones y elementos útiles para una cantidad increíble de aplicaciones.

2.2 SAMD21

El microcontrolador elegido para el sistema es el SAMD21[4] de Atmel (actualmente Microchip), concretamente el SAMD21G-18A, que cuenta con 48 pines, más que suficiente para la función que se va a implementar. A continuación, se van a detallar los motivos por los que este microcontrolador se adecúa a los requisitos del sistema.

El primero es el bajo consumo energético que tiene este microprocesador. Está basado en el núcleo Cortex-M0 de ARM, cuyo enfoque de diseño es la arquitectura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). La idea de dicha arquitectura es simplificar el número de instrucciones que se ejecutan en cada ciclo. Esta configuración implica menor cantidad de transistores en el procesador, lo que deriva a su vez en menor gasto energético y,

consecuentemente, menor calor generado. Todos estos factores posibilitan que la eficiencia energética sea alta, lo cual es una gran ventaja para aplicaciones que dependan de una fuente externa de alimentación, véase la batería, que es necesaria incluir para dar soporte al sistema.

En relación con el punto anterior, cabe mencionar la posibilidad de alimentarlo con varios valores de tensiones. Su rango de tensión de alimentación es de 1.62V a 3.63V, lo que permite rangos de tensión CMOS (3.3V) en vez de 5V. Además de ello, dispone de un modo LowPower que le permite alimentarse a únicamente 1.8V.

Como es evidente, para un mismo consumo de corriente de un dispositivo, disminuir su tensión de alimentación provoca una disminución de energía consumida del mismo proporcional a bajada de tensión. Este hecho se observa mediante la expresión:

$$P = V * I$$

Donde P es potencia, V es el voltaje e I es la intensidad de corriente.

Feature	ATSAMD21G18A	ATmega328P
Architecture	ARM Cortex-M0+	AVR
Bus Size	32-bit	8-bit
Max CPU Speed	48MHz	20MHz
Flash	256KB	32KB
SRAM	32KB	2KB
EEPROM	32KB (emulated in Flash)	1KB
Voltage Range	1.62-3.63V	1.8-5.5V
GPIO Count	38	23
ADC Channels	14	8
ADC Resolution	12-bit	10-bit
Digital-to-Analog Converter (DAC)	Yes	No
USB Controller	Yes	No
Direct Memory Access (DMA)	12 Channels	No
Peripheral Touch Controller	Yes	No
Inter-IC Sound I ² S	Yes	No

Figura 9. Comparación entre SAMD21g18 y ATmega328P (Fuente <https://medium.com/>)

Teniendo en cuenta qué variantes ofrece el mercado a un precio similar al de este microcontrolador, aparecen opciones como el ATmega328p, también de Atmel. O por ejemplo la familia SAMD51. Sin embargo, hay varias diferencias que hacen que el SAMD21 sea una mejor opción para la aplicación que se está desarrollando.

Tal y como se puede ver en la Figura 9, la arquitectura en la que están basados es diferente, y ya se han comentado las ventajas de ARM. Por otro lado, la velocidad de procesamiento es bastante mayor, pudiendo llegar a 48MHz internamente generados. Este dato es importante debido a que en el SAMD21 se dispone de un sistema de reloj en tiempo real (RTC) por separado, conectado de forma externa a un cristal de cuarzo de 32.768 kHz. Esto permite que el microcontrolador siga funcionando a 48 MHz gracias a su oscilador interno. Sin embargo, en el ATmega el RTC se debe conectar externamente a un cristal de 32.768 kHz, sacrificando su límite de 20 MHz de procesamiento.

Por otro lado, cabe mencionar la mayor resolución del ADC que incorpora el SAMD21, lo que permite mayor precisión a la hora de realizar mediciones de tensión.

Por último, y posiblemente el factor más sensible a la hora de elegir este microcontrolador ha sido la inclusión del protocolo I²S (*Integrated Interchip Sound*) que emplea el sensor de ruido que se va a utilizar y que, por tanto, convierte este factor en determinante a la hora de elegir el microcontrolador que se va a usar.

El precio también ha sido un factor a tener en cuenta, ofreciendo este SAMD21 unas especificaciones técnicas mejores que su competencia por un precio similar. (Hay que recalcar que dentro de estas alternativas no se cuenta con el protocolo I²S)

Microcontrolador	Fabricante	Mouser	Farnell
ATSAMD21	Atmel	2.55€	3.58€
Competencia			
ATmega328P	Atmel	1.87€	2.51€
ATSAMD11	Atmel	1.24€	1.84€
XMC1300	Infineon	1.70€	3.85€
LPC844	NXP	1.90€	2.20€

Tabla 1. Comparativa de precios de diferentes alternativas

Como se puede comprobar, la diferencia de precio no es mucha, variando esta entre distintos vendedores. Sin embargo, las posibilidades que ofrece marca la diferencia.

2.3 Sensor empleado

Para la detección del ruido ambiente es necesario usar un sensor capaz de captar las ondas de presión sonoras que se producen en el entorno. Esta labor es crítica para el proyecto y es por ello por lo que hay que elegir con cuidado este elemento para poder tener después medidas fiables.

Dentro de los diferentes tipos de sensores de sonido que existen en el mercado (Micrófono de condensador RF, **de condensador Electret**, dinámico, de cinta, de carbono, piezoeléctrico, de fibra óptica, láser, líquido, y **microelectromecánico (MEMS)**), cabe destacar que la tecnología que más se ha usado hasta el día de hoy, debido a su fiabilidad al proporcionar datos ha sido la de condensador Electret. Esta tecnología es la más común y se usa en la mayoría de las aplicaciones electrónicas de consumo (teléfonos, grabadoras, etc.)

Se basa en un condensador cuyas placas ya están polarizadas desde su fabricación. Las ondas de presión desplazan el diafragma (membrana del sensor), provocando un cambio en la capacidad, lo que deriva en una variación de voltaje a través de la relación:

$$\Delta V = \frac{Q}{\Delta C},$$

donde Q = carga acumulada, ΔC = variación de capacidad y ΔV = variación de tensión.

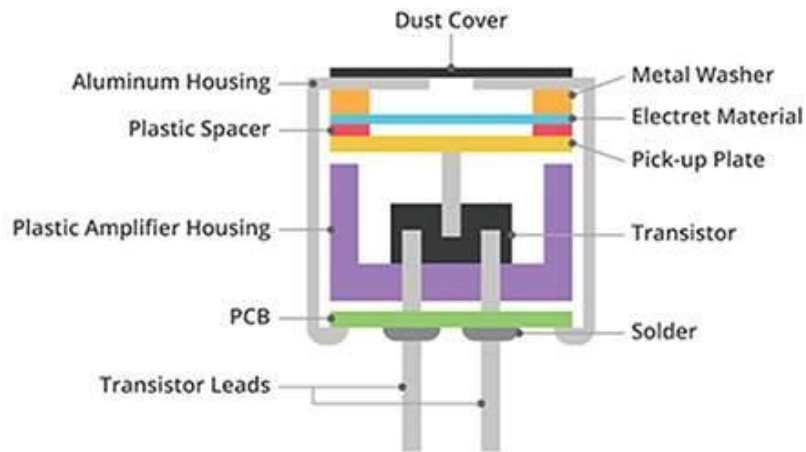


Figura 10. Composición de un micrófono de condensador Electret. (Fuente: <https://www.digikey.es/es/supplier-centers/c/cui-devices>)

Por otro lado, los dispositivos MEMS, especialmente los sensores basados en esta tecnología están teniendo cada vez más importancia en el sector tecnológico. En este sentido, tienen la ventaja de ser más pequeños, tener un costo de fabricación más bajo y ser más resistentes ante vibraciones y agentes externos (importante para esta aplicación). Estos sensores tienen un principio de funcionamiento parecido a los anteriormente mencionados, pero con matices. En este caso, la membrana semirrígida (o diafragma) es el componente fabricado con tecnología MEMS, directamente sobre una placa de silicio. Suelen estar colocados sobre una PCB y cubiertos por una capa protectora con un agujero para que entren las ondas de presión del aire.

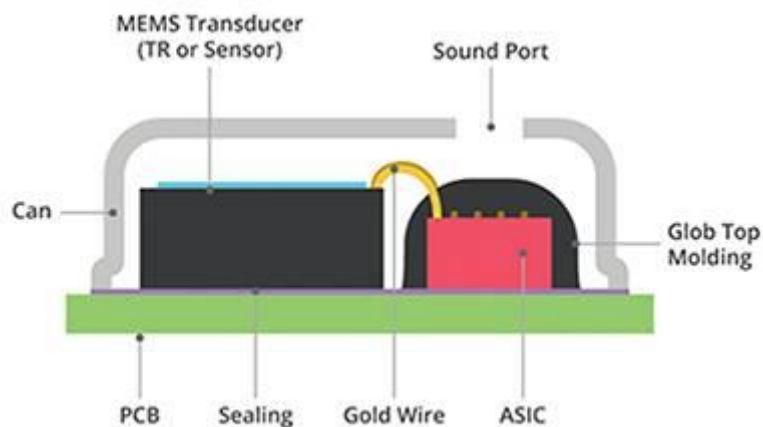


Figura 11. Composición de un sensor de ruido MEMS completo

La principal ventaja que tiene este tipo de sensor es que incorpora un convertidor de analógico-digital (ADC) en el mismo molde que el preamplificador de audio. Una vez convertido, gracias a la codificación de un solo bit de los datos, se facilita la decodificación de la señal digital en el receptor, en este caso, el microcontrolador. De esta forma, se pueden usar protocolos como el ya mencionado I²S para que la salida de datos pueda ser tratada directamente.

Además, la capacidad de ser más resistentes a las vibraciones mecánicas ayuda a que dichas vibraciones no aparezcan en la salida del sensor como ruido indeseado. Estos motivos propician que la solución óptima sea la de la tecnología MEMS para el sensor.

2.3.1 Protocolo I²S

Este estándar se ha mencionado varias veces a lo largo de la memoria. Se trata de un bus serie usado para comunicar elementos de audio de forma digital. Una de sus particularidades es el uso de dos líneas de señal independientes para Reloj (CWLK) y Datos (SD), lo cual resulta en una disminución del *jitter* (ligera desviación de la exactitud de la señal digital respecto a la de reloj) en el envío de la señal con respecto a otros protocolos donde la señal de reloj se extrae a partir de la señal de datos. El *jitter* provoca que ruido de fondo no deseado aparezca como ruido en la medida debido al desfase existente entre las señales de reloj y datos, ya que se podría entender a estas señales no deseadas de fondo como un dato a enviar. Gracias a la estructura del protocolo I²S, este efecto se ve disminuido, mejorando la calidad de la entrada de señal de audio.

Además de las líneas de datos y reloj, el protocolo incluye una línea llamada *Word Select* (WS) que sirve para seleccionar el canal izquierdo o derecho dentro de una recepción de sonido estéreo [5]. Para llevar a cabo la recepción estéreo del sonido se necesitan dos sensores, comportándose uno de ellos como el canal izquierdo de audio y otro como el canal derecho. En principio, la captación del sonido se realizará mediante un único micrófono.

Existen dos formas para el envío del dato. Los datos se envían de forma modulada (*Pulse Code Modulation*), de forma que un dispositivo que incorpore un DAC (Digital-Analogic Converter) podría llevarlo a una salida analógica de audio. Sin embargo, también existe la opción de que el microcontrolador reciba los datos de sonido digitales y los trate de forma digital, sin pasar por ningún convertidor. De esta forma se podrían reenviar los

datos a otros módulos con protocolos de comunicación digitales, tal y como es la comunicación UART con el módulo SigFox que se va a emplear.

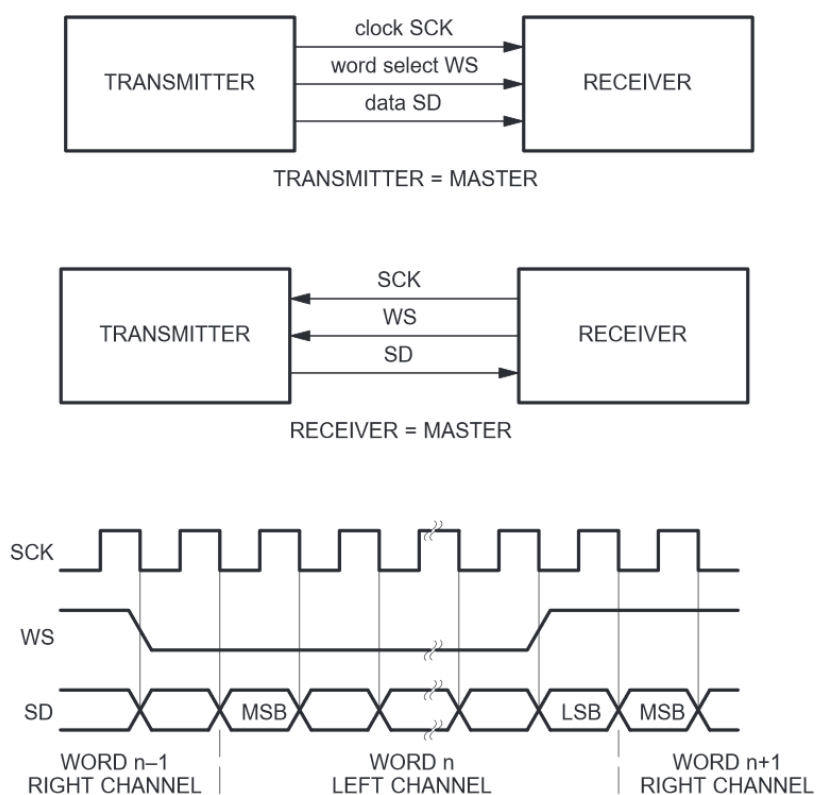


Figura 12. Esquema de funcionamiento del protocolo I2S

El envío de los datos se produce partiendo del MSB (*Most Significant Bit*). El transmisor envía este bit primero porque su tamaño de palabra podría diferir con el del receptor. Es una forma de avisar al receptor del tamaño del mensaje. Debido a ello, se plantean dos situaciones. En caso de que el tamaño de palabra del receptor sea menor que la palabra que se ha enviado, esta se trunca. Es decir, los bits correspondientes a los valores menos significativos se ponen a 0 para la transmisión y se descartan durante el envío. Sin embargo, si la longitud de la palabra que se va a transmitir es menor que la que espera el receptor, los bits restantes se ponen a 0 internamente en el receptor.

Por otro lado, en este tipo de comunicación, cualquiera de los dispositivos (transmisor o receptor) puede actuar como maestro, y es el encargado de enviar la señal de reloj al esclavo para su sincronización. Hay que tener en cuenta que, en el receptor, la recogida de los datos debe ir sincronizada con el flanco de subida de la señal del reloj, cosa que no

es obligatoria en el caso del transmisor. Además, cuando se produce un cambio en la selección del canal, este cambia un ciclo de reloj antes de que se envíe el MSB correspondiente al nuevo mensaje. En principio, este hecho no afectará en la programación del dispositivo ya que, como se ha mencionado anteriormente, se va a usar un único sensor. De cualquier manera, el ciclo de reloj en el que se cambia de canal permite que el transmisor sincronice el bit que se va a enviar con cada ciclo del reloj, además de que el receptor almacene el mensaje anterior y limpie el buffer de entrada para el nuevo mensaje.

Como en cualquier comunicación, existe cierto retraso de propagación en las señales, principalmente entre la de reloj y la de los datos. (No confundir con el fenómeno de *jitter* ya mencionado. En este caso se trata de los tiempos que tardan las señales en pasar de un estado lógico alto a uno bajo, y viceversa. No tiene nada que ver con desfase entre señales)

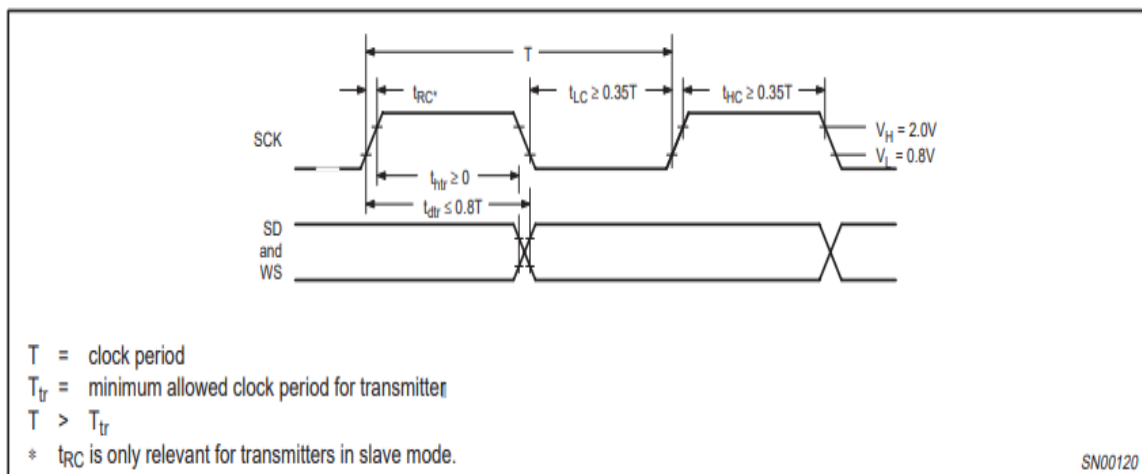


Figura 13. Esquema temporal de las señales del protocolo I2S

En este caso, el retraso total será la suma del tiempo de retraso entre la señal de reloj del maestro y el esclavo, más el tiempo de retraso entre el reloj y la señal de datos o de selección del canal. Es decir:

$$T_{total-delay} = t_{master-slave} + t_{delay}$$

En total, el delay (retraso) no puede superar un valor de $0.8 \cdot T$, siendo T el período de la señal de reloj. Este período es muy pequeño, ya que la frecuencia de la señal de reloj

alcanza fácilmente los MHz, lo que permite obtener medidas de frecuencias altas para el oído humano, como pueden ser los 20kHz que marcan el límite del rango audible.

En cualquier caso, este protocolo es ideal para la aplicación que se pretende desarrollar y permitirá una comunicación directa y sencilla entre el sensor y el microcontrolador para poder tratar los datos de audio de forma digital, sin necesitar ningún tipo de convertidor intermedio y con una buena calidad en la transmisión.

2.3.2 Parámetros de elección del sensor

Partiendo de las características que se buscan en el sensor de ruido y la forma en la que éste se conectará al microcontrolador para el envío y recepción de datos, es necesario mirar al mercado para escoger un sensor adecuado. Ya se han definido características de hardware y software para el mismo. Pero hay que ver los requisitos técnicos que se precisan en el sensor para que cumpla con la aplicación. Dentro de las características técnicas se encuentran:

-Direccionalidad

La **direccionalidad** se define como la variación de la sensibilidad del micrófono en función de la dirección de incidencia de la onda acústica sobre el mismo [6].

Puede ser:

- **Micrófono omnidireccional:** tiene la misma sensibilidad para todas las direcciones, por lo que percibe todas las ondas sonoras con la misma intensidad independientemente de su dirección de procedencia.
- **Micrófono direccional:** tiene un patrón de sensibilidad que da preferencia a los sonidos que provienen de una única dirección del espacio, disminuyendo progresivamente a medida que los sonidos inciden desde direcciones más laterales/posteriores, llegando al punto de mínima sensibilidad, que se localiza justo en la dirección opuesta respecto a la dirección de máxima sensibilidad, es decir 180° respecto a la dirección privilegiada.
- **Micrófono bidireccional:** es un micrófono direccional que tiene la máxima sensibilidad para dos direcciones del espacio opuestas en 180°.

Los micrófonos con algún tipo de direccionalidad necesitan dos entradas de sonido para poder ejercer esta función de selectividad espacial. La característica direccional se plasma mediante diagramas polares como el que se puede ver en la Figura 14, que dan información de la sensibilidad en función del ángulo de incidencia. En la dirección o direcciones preferente(s) se percibe el sonido con una disminución de 0 dB, mientras que, a medida que se llega a las zonas en las que el micrófono es incapaz de sensar, se disminuye la percepción del sonido en valores de hasta -50dB.

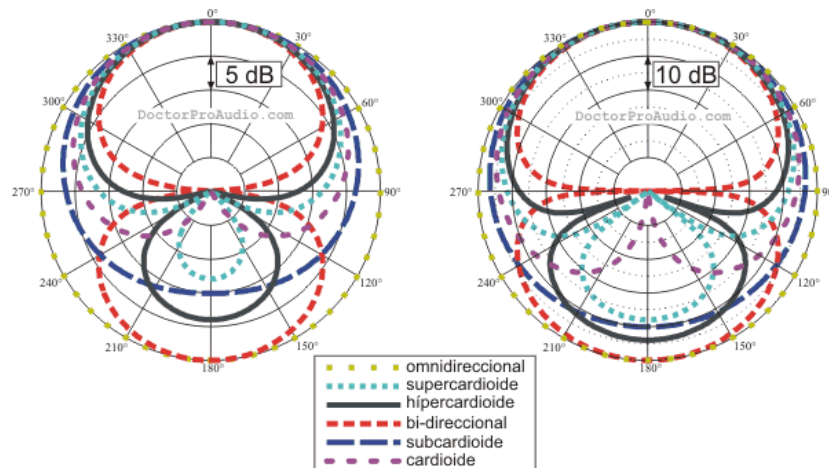


Figura 14. Diagrama polar de direccionalidad

-Rango de frecuencias

Es el ancho de banda en el que el sensor es capaz de medir variaciones de presión sonora. Relacionado con este parámetro está pues, la respuesta en frecuencia del sensor, definido como el valor de amplitud (en dB) en el que el sensor capta cada frecuencia dentro del rango.

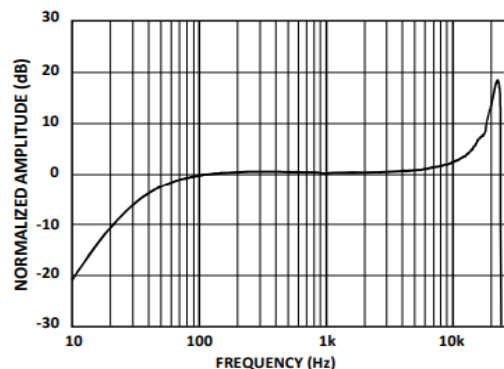


Figura 15. Respuesta en frecuencia del sensor comercial ICS-43432

-Sensibilidad

Es la relación entre la tensión que proporciona el sensor y la presión sonora a la que se refiere, por lo que se expresa como V/P_a . También se puede encontrar de forma logarítmica referida a una frecuencia de 1kHz y a un nivel de presión de 94dB (ya que es el equivalente a 1Pa de presión) [6][7]:

$$S(dB) = 20 * \log \left(\frac{S}{1} * \frac{V/P_a}{V/P_a} \right)$$

En micrófonos digitales, este valor se expresa en forma de porcentaje del valor de tensión de salida con respecto al valor que proporciona su fondo de escala. (Definido como 0 dB FS debido a lo siguiente. La presión límite que aguanta el sensor es su fondo de escala, con lo que si se define el dB FS como:

$$dB FS = 20 * \log \left(\frac{\text{Presión Sonora}}{\text{Presión Fondo de Escala}} \right),$$

se obtendrá un valor de 0 dB FS para la presión del fondo de escala).

Para ello, se excita el sensor con una presión sonora de entrada de 94 dB (1 Pa) y se ve que valor de salida digital ofrece en relación a la salida a fondo de escala, la cuál sería un 1 lógico (en este caso serían 3.3V ya que el sensor estará alimentado a este valor de tensión). [8]

$$S(dB FS) = 20 * \log \left(\frac{\text{Sensitivity}(\% FS)}{\text{Output Ref (1.0)}} \right)$$

-Nivel de ruido

Corresponde al ruido eléctrico intrínseco del sensor, y es el resultado de la medición de su tensión en bornes, sin ningún tipo de excitación. Incluye el ruido por el micrófono y la electrónica incorporada en el encapsulado del micrófono MEMS. Hay dos formas de expresar su valor: asociándolo al valor que le correspondería en nivel de presión sonora equivalente (en dB), o –el más común– mediante la relación señal/ruido ($SNR = \text{Signal to Noise Ratio}$), donde:

$$SNR = 20 * \log \left(\frac{V_{señal}}{V_{ruido}} \right)$$

.

-Nivel de ruido Equivalente (*EIN*)

Hace referencia a qué cantidad de ruido se introduce en la señal del micrófono por parte del preamplificador [9] que se encuentra conectado al micrófono, así como de ruido térmico intrínseco al mismo. Este nivel de ruido pasa a través del micrófono y se mide a la salida. La prueba se realiza en una cámara anecoica con el ancho de banda completo. Se deriva a partir de los valores de 94 dB de referencia y el SNR.

$$EIN = 94 \text{ dB} - SNR$$

Las ondas de presión por debajo del nivel mínimo que marca el *EIN* se encuentran por debajo del umbral mínimo de captación del sensor, por lo que para estos valores el sensor no proporcionará una salida.

-Distorsión Armónica

Corresponde a la deformación de onda de salida respecto a la forma de onda de entrada. La onda de entrada suele estar dada para una frecuencia tonal, generalmente 1 kHz, y la Distorsión Armónica Total (THD) se corresponderá a la suma de las potencias de las frecuencias que componen la onda de salida respecto a la potencia de la onda de entrada, es decir:

$$THD = \sqrt{\frac{P_d}{P_i}},$$

con $P_d = \text{Potencia distorsionada (salida)}$ y $P_i = \text{Potencia de entrada}$

En los micrófonos MEMS, la THD se calcula con los primeros cinco armónicos de la frecuencia fundamental. [8]

Una vez definidos los principales factores limitantes en la elección del sensor, se introduce una tabla que refleja los valores adecuados para la función que se va a desarrollar, que es el utilizar el sensor de ruido en la vía pública.

Tabla de parámetros con valores adecuados para el diseño

Direccionalidad: Omnidireccional

Detalles: Al ser empleado en un ambiente abierto, es necesario que pueda medir sin ninguna disminución de potencia cualquier ruido de su alrededor.

Rango de frecuencias: 20Hz-20kHz

Detalles: El sensor debe ser capaz de medir ruido en el rango de frecuencias audible por el ser humano.

Sensibilidad: $> -60\text{dB}$

Detalles: Puesto que los valores de sensibilidad suelen ser negativos debido a la referencia de la medida, mientras menos negativa sea, mayor sensibilidad tendrá el sensor. Es decir, un mayor valor de voltaje para un incremento de presión indica que la sensibilidad será mayor.

Nivel de ruido (SNR): $> 60\text{ dB}$

Detalles: Actualmente, los sensores de buenas prestaciones ofrecen un valor de 65 dB en adelante. Se debe a que para un input de 94 dB SPL, el sensor tiene en la salida un ruido (EIN) de 29 dB. En comparación con los micrófonos de condensador Electret, se puede decir que a igualdad de SNR, los micrófonos MEMS son mucho más pequeños. [10].

Distorsión Armónica: $< 3\%$ 105dB

Detalles: Puesto que la distorsión aumenta acorde al nivel de presión de entrada a razón de triplicarse cada 10 dB, si existe menos de un 3% de distorsión total a 105 dB, este será menor a un 1% con una entrada estándar de 94 dB. [8]

Nivel de ruido equivalente (EIN): $= 94\text{ dB} - \text{SNR}$

Detalles:

Tabla 2. Valores recomendados de los parámetros de los micrófonos MEMS

Dentro de los sensores disponibles en el mercado, hay que ver qué características ofrecen cada uno de ellos que cumplan las especificaciones mencionadas. Entre los fabricantes que más soluciones ofrecen se encuentran *TDK InvenSense*, *Knowles Syfer*, *CUI Devices* y *Infineon*

2.3.3 Elección del sensor

Teniendo en cuenta los parámetros expuestos, se ha procedido a la elección del sensor adecuado. Para ello, se ha partido de las características técnicas de los sensores Electret y MEMS, los mejores y más utilizados. En primer lugar, se realizó una búsqueda entre algunos sensores de tipo condensador. El fabricante que más opciones ofrecía era CUI Devices, por lo que se examinaron algunos sensores de su gama con precio similar a las variantes de tipo MEMS, de las que se hablará en breve. Una tabla comparativa exponiendo las diferencias de los sensores comerciales en base a los parámetros descritos se expone a continuación.

Modelo	Fabricante	Tipo de Salida	Direccionalidad	Rango de frecuencias	Sensibilidad	SNR	Nivel de Ruido Equivalente	Distorsión Armónica (típica)
CMEJ-4622-25L082	CUI Devices	Analógica	Omnidireccional	100Hz-10kHz	-25 dBA	65 dBA	29 dB	3%
CMEJ-0627-42-P	CUI Devices	Analógica	Omnidireccional	100Hz-10kHz	-42 dBA	60 dBA	34 dB	3%
CMEJ-041342SMTTR	CUI Devices	Analógica	Omnidireccional	100Hz-10kHz	-42 dBA	60 dBA	34 dB	3%
INMP621ACEZ-R7	TDK InvenSense	Digital	Omnidireccional	75Hz-20kHz	-46 dBA	65 dB	29 dB	0.35%
ICS-43432	TDK InvenSense	Digital	Omnidireccional	50 Hz-20kHz	-26 dB	65 dBA	29 dB	0.3%
SPH1642HT5H-1	Knowles Syfer	Analógica	Omnidireccional	100Hz-10kHz	-38 dB	65 dBA	29 dB	0.25%
SPH0645LM4H-B	Knowles Syfer	Digital	Omnidireccional	10 Hz - 10kHz	-26 dB	65 dBA	29 dB	0.2%
CMM-4030DT-26354-TR	CUI Devices	Digital	Omnidireccional	100 Hz - 10 kHz	-26 dB	65 dBA	29 dB	0.2%
IM69D130V01XTS A1	Infineon	Digital	Omnidireccional	2.9MHz-3.3MHz	-36dB	69 dBA	25 dB	0.5% (medido a 94 dB SPL)

Tabla 3. Comparativa de sensores comerciales

Las opciones que se han propuesto se encuentran dentro de un mismo rango de precio, de entre 1€ a 2.5€. Sin embargo, el lector podrá notar rápidamente que hay características de los sensores que descartan el uso de algunos de ellos.

Para empezar, las cualidades de los de tipo condensador quedan por debajo técnicamente de los MEMS. Además de ello, son más grandes y consumen mayor energía. Por otro lado, la capacidad de ser más resistentes a las vibraciones mecánicas de los MEMS los hace más robustos y confiables en sus mediciones. Estos motivos propician que la solución óptima sea la de la tecnología MEMS para el sensor.

Partiendo de este hecho, se pretende que el rango de frecuencias en el que funciona el sensor sea lo más parecido posible al rango audible del oído humano (20Hz – 20kHz) por lo que algunos modelos de los mostrados no podrían ser utilizados, como son los modelos de Knowles y CUI, cuyo rango de frecuencias perceptibles es un poco inferior. Cabe mencionar que el modelo de Infineon funciona a un rango de frecuencias muchísimo más elevado, dentro de los megahercios, por lo que queda completamente descartado.

Por otro lado, el modelo SPH1642HT5H-1 de Knowles tiene una salida analógica, por lo que queda descartado ya que quiere que la salida del sensor sea digital para comunicarse con el microcontrolador por el puerto I²S.

Finalmente, quedan los sensores de InvenSense, los cuáles cumplen con los requisitos que se han detallado anteriormente. Las principales diferencias se encuentran en la sensibilidad, que en el caso del ICS-43432 es bastante mejor (-26 dB vs los -46 dB del INMP621ACEZ-R7) y en que su distorsión armónica es algo mejor. Aunque por otro lado el precio de este último es más competitivo. Mirando más en profundidad las hojas de características de ambos sensores aparecen más diferencias que permiten decantar la balanza. El límite de presión acústica que aguanta el INMP621ACEZ-R7 es superior al del ICS-43432, de 133 dB frente a los 116 dB, aunque cualquiera de los dos valores supera los requisitos del sistema ya que, al estar situado en un entorno público, rara vez se van a superar los 100 dB de presión sonora (ruidos de reactores, conciertos de rock, etc., son algunos ejemplos de ruidos con mayor potencia). Otra situación diferente sería que el sistema se implantase dentro de una fábrica o de algún edificio de construcción, donde la maquinaria en un espacio cerrado sí puede superar ampliamente los 100 dB mencionados anteriormente. Además, el rechazo al ruido que pueda venir de alimentación también mejora en el INMP621ACEZ-R7, alcanzando cotas de -100 dB. Desde luego, parece una elección mejor que la del ICS-43432. Sin embargo, aunque su salida sea digital, no

cumple con el protocolo I²S, usa una comunicación de tipo PDM (Pulse Density Modulation) [11]. Esta modulación codifica el sonido en un único bit a una frecuencia de muestreo muy alta, por encima de la frecuencia clásica de $2 \cdot f_s$ (2 veces el ancho de banda máximo)

Este último factor ha sido clave para terminar de elegir el sensor adecuado para la aplicación que se está diseñando. El elegido es el ICS-43432 de InvenSense. [12]

2.4 Módulo de comunicación

Para poder monitorear a distancia los datos que se recogen mediante el sensor de ruido, es necesario establecer comunicación con el dispositivo para poder ver los datos recogidos en tiempo real, así como comprobar el estado del equipo y visualizar diferentes parámetros de este. Hay más tecnologías disponibles que se centran en la comunicación IoT, pero que no son tan atractivas, como pueden ser ZigBee, las redes 2G/3G/4G o GPRS ya que no mejoran lo que ofrece SigFox. Últimamente están surgiendo más redes basadas en LPWAN, como por ejemplo LoRa, que poco a poco están empezando a competir con SigFox. Sin embargo, esta última sigue siendo mucho más global y tiene mucha más cobertura que LoRa.

Por otro lado, en la anterior versión del dispositivo, ya se utilizó la comunicación mediante SigFox y acabó siendo muy satisfactoria. Por todos estos motivos, se pretende seguir usando esta tecnología en la actual versión del dispositivo.

2.4.1 SigFox

2.4.1.1 Contexto dentro del proyecto

La plataforma SigFox [13] es una red de comunicación cuyo foco está principalmente en el IoT. Para ello, su red se encuentra en la banda de radio (en torno a los 868 MHz para Europa y 902MHz en EEUU), usando espectro de frecuencia sin licencia (bandas ISM)

La tecnología empleada se denomina *Ultra Narrow Band*, y, como su nombre indica, se basa en el uso de anchos de banda muy estrechos que permitan al receptor de los mensajes rechazar de forma sencilla cualquier interferencia externa que se encuentre fuera de la banda permitida. Esto garantiza una fiabilidad muy alta en la transmisión de mensajes.

Además, los datos requieren de poca energía para ser enviados, por lo que reduce el consumo energético de los dispositivos que se estén comunicando.

Concretamente, SigFox se encuentra dentro de las denominadas *LPWAN* (*Low-Power Wide Area Network*) que refleja algunas de las ventajas mencionadas. Una muestra de diferentes redes se ha reflejado en la Figura 16. Principalmente el consumo energético, y el amplio rango de acción que permite esta tecnología, hacen que SigFox sea la mejor opción para la aplicación.

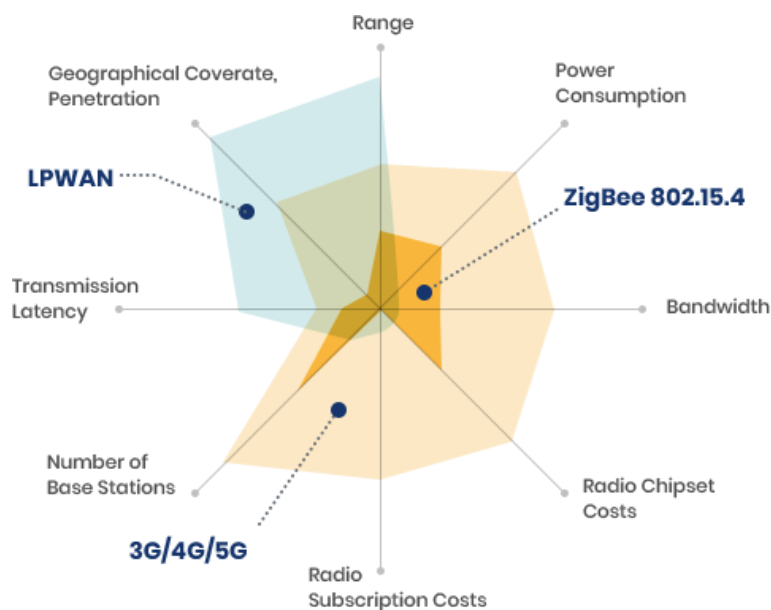


Figura 16. Redes de comunicación para IoT. Fuente (<https://www.haxiot.com/>)

2.4.1.2 Funcionamiento

Ya se han definido las principales características de la red SigFox, pero hay que establecer las bases de su funcionamiento. En cada envío se usa un canal de 200kHz donde cada mensaje tiene un ancho de 100 Hz.

La forma en la que se realizan los envíos es en forma de paquetes pequeños, de 12 bytes cuando un dispositivo envía un mensaje (Uplink) u 8 bytes cuando se está recibiendo un mensaje (Downlink). Estos mensajes se mueven a una tasa de entre 100-600 bits por segundo, por lo que el proceso de comunicación suele durar unos pocos segundos.

El sistema permite que se hagan 140 mensajes máximos por día en su paquete de datos básico, el cual es más que suficiente para el uso del dispositivo que se va a hacer. 140 mensajes de envío se corresponden casi a un paquete cada diez minutos y, en este caso,

se van a aprovechar los 12 Bytes que contiene el paquete de payload (o carga útil) para enviar 10 promedios diezminutales en sendas variables de tipo Byte. Esto no quita que la medida se haga de forma continua (o en muestras muy próximas, cada segundo) acumulando en variables todos los valores medidos para luego hacer los promedios correspondientes.

La clave de la red se encuentra en su Cloud. La plataforma está centralizada en torno a este servicio, que recibe los mensajes y los transmite. El ciclo de vida de un mensaje es:

- 1.- Un dispositivo envía a través de su antena un mensaje.
- 2.- Varias estaciones cercanas reciben el mensaje y lo envían al Cloud de SigFox
- 3.- La nube lo reenvía al *Backend* del cliente que tiene que recibir el mensaje.



Figura 17. Principio de funcionamiento de la red SigFox

2.4.1.3 Backend de SigFox

El backend es una magnífica herramienta para establecer comunicación con cualquier dispositivo que tenga una conexión a la red SigFox. Para acceder a este servicio es necesario registrar un dispositivo en la web que ofrecen

Desde él se puede acceder a los datos que se han enviado desde un dispositivo o programar el envío de datos a dicho dispositivo para que se realice una vez se conecte (Downlink). Es decir, se trata de una herramienta con la que es posible realizar configuraciones al sistema a distancia, simplemente mediante el envío de datos a través de esta plataforma. El sistema recibe los datos utilizando una URL de callback, identificando dicha URL con la aplicación web que desea recibir los mensajes. De esta forma, se registra dicha URL

en el backend, indicando los atributos que le interesa recibir (por ejemplo, la carga útil de la batería)

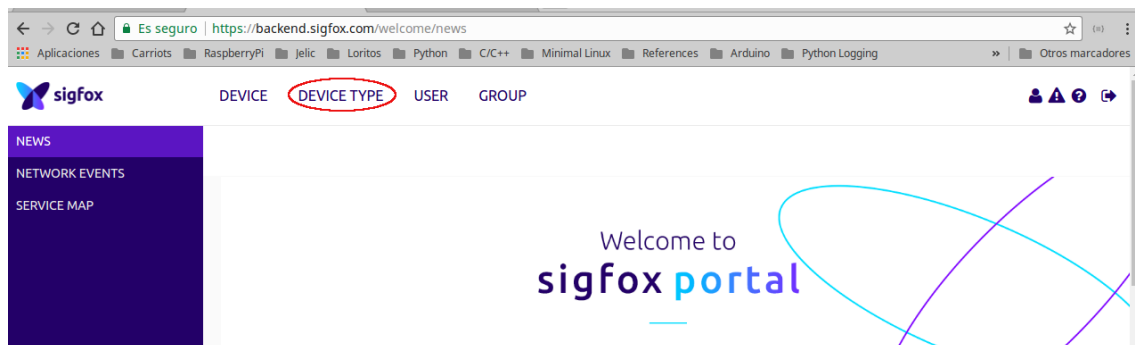


Figura 18. Página web del Backend (<https://backend.sigfox.com/auth/login>)

Lo que lo hace más interesante si cabe, es que no es necesario que el sistema esté siempre activo esperando la recepción de algún mensaje de configuración. Simplemente, se establece un protocolo en el que el Cloud de SigFox guarda el mensaje enviado a través del Backend y cuando el dispositivo asociado envíe algún dato, en caso de que exista un indicador de petición de Downlink, se reciben los datos en el dispositivo durante los próximos 30 segundos. Este indicador (flag) es un código que se incluye al final de un mensaje de Uplink.

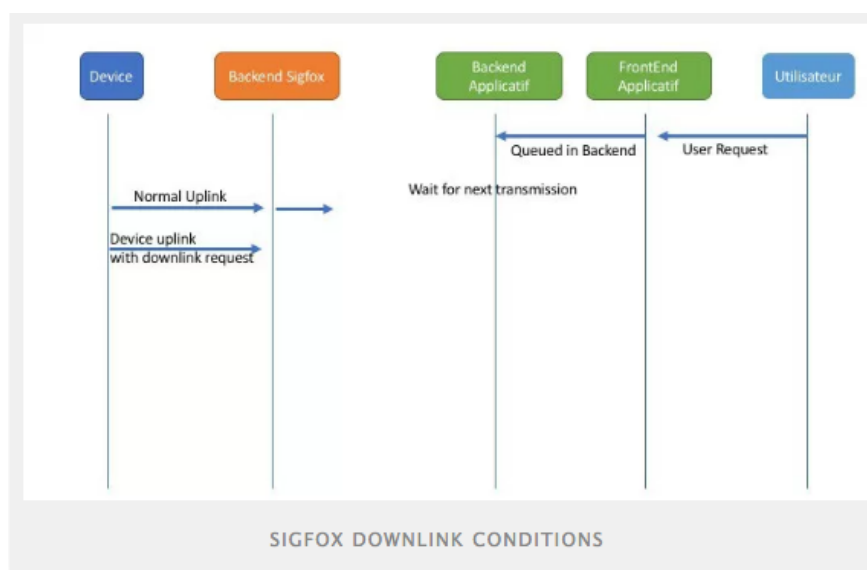


Figura 19. Condición de envío de Downlink

2.4.2 Módulos integrados de comunicación

SigFox se encuentra disponible a través de los principales proveedores de chips y módulos del mercado (entre otros; Silicon Labs, Texas Instrument, Intel, Telecom Design, Microchip etc.), ofreciéndoles soporte y facilidades para la integración de sus equipos en la red. De esta forma, permite la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes. Dentro de los principales fabricantes que se han destacado, cabe mencionar a Telecom Design, concretamente a su división TD Next [14].

Desde los inicios de SigFox, Telecom Design ha mantenido acuerdos para el desarrollo de productos que implementasen la compatibilidad necesaria con dicha red. La motivación principal para ello ha sido la experiencia de Telecom en el ámbito del IoT, donde están trabajando desde hace más de 15 años. A partir del 2011, desarrollaron la tecnología Cloud-On-Chip, a raíz de lo cual se creó la división *TD Next*, encargada de diseñar módems de radiofrecuencia para Sigfox. De hecho, esta fue la primera tecnología en usar la red SigFox. Desde la creación de Cloud-On-Chip se han propuesto varias soluciones comerciales, como se verá a continuación con la serie TD120x.

2.4.3 Elección del TD1208r de *TD Next*

La familia de módulos de comunicación de TD Next se denomina TD120x. Son presentados en placas de evaluación de tamaño reducido y bajo consumo, aptos para su introducción en el mundo del IoT, y con funcionalidad de módems para la transmisión de señales. Cada modelo se identifica con un nombre único, y se diferencia del resto por las capacidades que ofrece. En la siguiente imagen se puede observar una clasificación de los modelos disponibles en función de las capacidades que ofrecen.

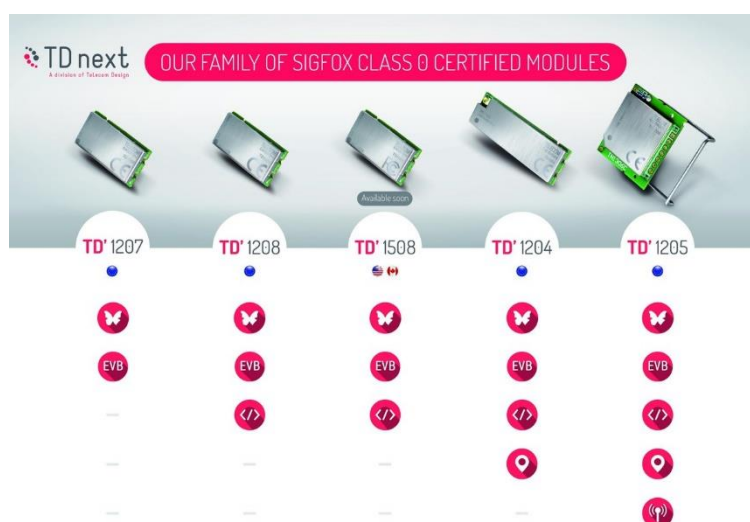


Figura 20. Tabla comparativa de la familia de módems de TD Next (Extraída de Fuentes Oficiales)

	Certificado por SigFox
	Dispone de un Entorno de Desarrollo Software concreto
	GPS integrado
	Antena integrada

Tabla 4. Leyenda de la tabla de características de los módulos TD120Xr

Tal y como se puede comprobar, todos los módulos se encuentran certificados por SigFox. Dentro de los cinco modelos que se presentan, en un primer momento se descarta el uso del TD1508 debido a que es un modelo específico para el mercado americano. Recordar que la banda de frecuencias en América es diferente a la que se usa en Europa. (902 MHz en EEUU y 868 MHz en Europa)

Por otro lado, se descarta el TD1205P. ya que no se precisa que incorpore una antena integrada porque, además de aumentar el coste, el tamaño y el peso del módulo, se dispone de una antena externa que se conectará al módulo a través de un conector soldado

a la PCB. Lo mismo ocurre con el TD1204r, que incorpora GPS y acelerómetro. Ambas funcionalidades no se plantean usar en el presente trabajo, por lo que se puede simplificar la elección del módulo a los TD1207/08. En cuanto a especificaciones técnicas son idénticos, y éstas se comentarán en el apartado 2.4.3.1 de la memoria. En este caso, lo importante es recalcar que ambos módulos tienen la misma capacidad de funcionamiento. En cualquier caso, para ampliar la información de estos componentes se adjunta la información del fabricante [15]. La única diferencia entre los módulos es que el TD1208r dispone de la herramienta de desarrollo para su programación (SDK). Aunque en un principio no se piensa usar dicho kit de desarrollo software, se va a elegir este módem de cara a dejar abierta la posibilidad de incluir futuras mejoras del sistema en la que sea necesaria la programación concreta del módulo. Para ello se va a dejar listo una serie de pines conectados a los pines dedicados para esta función del TD1208r. La programación se realiza mediante una interfaz serie de dos pines clásica, SWDIO y SWCLK. Usando conexiones se podrá programar a través de su SDK.

2.4.3.1 Características generales del TD1208r

En la sección del TD1208r de la página oficial de los módulos de Telecom Design se puede encontrar documentación de utilidad sobre el módem. También se cuenta con una sección en la página de desarrolladores de Telecom Design.[16]

De manera general, el dispositivo es energéticamente eficiente, por la baja energía que consume, además de la poca corriente que demandan sus conexiones. Siguiendo con sus ventajas; se presenta como un producto de alto rendimiento para su uso como transductor de radiofrecuencia. Para ello, viene armado con un procesador ARM Cortex M3, y trabajando a una frecuencia de reloj de 32 KHz. En cuanto a capacidad se refiere, cuenta con una memoria RAM de 16 KB y una memoria Flash de 128 KB, por lo que no se debería tener problemas.

Como características adicionales, incorpora timers para poder realizar labores de temporización, y funcionalidades para poder formar una red local de sensores, disponiendo de modos de transmisión a la red local y de envío de mensajes a la red SigFox. Además, permite añadir multitud de sensores externos mediante las conexiones vía UART, I²C, ADC, DAC o GPIO, por citar algunos ejemplos. Todo este

comportamiento viene recogido, de manera esquemática, en el siguiente diagrama de bloques del dispositivo:

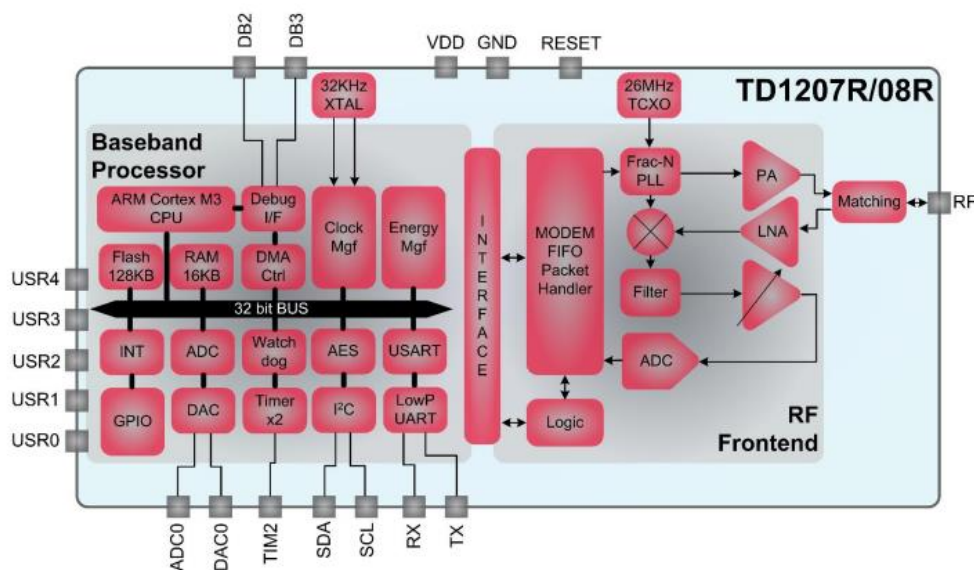


Figura 21. Diagrama de bloques del TD1208r (Fuente: datasheet del TD1208r)

Dentro del funcionamiento del sistema, este módulo va a tomar las veces de interfaz entre el sensor, el microcontrolador general y la red SigFox. De esta forma, existirá una comunicación en cadena hasta el módulo, de forma que los datos que se envíen desde el sensor al microcontrolador serán tratados y reenviados al TD1208r para que este último los reenvíe a la red de SigFox.

Como resumen, se puede decir que el TD1208r se presenta como una solución óptima para el proyecto ya que presenta características muy interesantes como su bajo consumo y su amplia capacidad de comunicaciones. (además de tener la posibilidad de usar un entorno de desarrollo específico para él). Esta versatilidad es clave de cara a mejorar el proyecto en un futuro.

2.5 Pantalla

2.5.1 Requisitos del sistema

Dentro de los añadidos que tendrá el dispositivo se encuentra la inclusión de una nueva pantalla (o display). El motivo de la inclusión de la pantalla es el de poder mostrar in-situ

una muestra de las medidas de ruido que se están produciendo en el entorno del dispositivo.

En la primera versión del dispositivo se incluyó un display de 7 Segmentos (TM1637). Sin embargo, esta pantalla consume demasiada corriente (unos 200mA) y es capaz de mostrar poca información. Sin embargo, en esta nueva versión se prioriza la eficiencia energética. Debido a ello, se va a emplear un panel OLED de bajo consumo. Este panel permite programarlo con mucha mayor libertad de opciones, pudiendo elegir color, tamaño de la fuente, la colocación de los elementos, etc. Un ejemplo simple de cómo mejora al sistema este panel es que en la versión anterior no se podía mostrar “80 dBA” ya que tiene más dígitos que el panel. En este caso se va a poder añadir información como la batería restante del sistema o la hora.

Cada vez que se pulse un botón el sistema mostrará por pantalla el promedio secundal del ruido durante 10 segundos. La idea es mostrar al menos 6 dígitos en la pantalla, correspondiente al valor en decibelios de la medida del ruido y a la ponderación que se va a utilizar: dBA, correspondiente a la forma más cercana del oído humano de percibir el sonido (además de ser la forma en la que lo capta el sensor).

De ser así se podrían mostrar 3 dígitos de valor numérico, más que suficiente ya que eso permitiría llegar a un valor de 999 dBA, muy por encima del valor máximo de ruido medible (y, por qué no, es un valor imposible de alcanzar físicamente hablando. Como curiosidad, la energía necesaria para producir un sonido de 1000 dB durante 1 segundo es mayor que la que se produce en todo el universo conocido). Tal y como se mencionó anteriormente, en principio es improbable que se supera un valor de 100 dB. En cualquier caso, este hecho queda sujeto a posteriores observaciones.

El display deberá comunicarse con el microcontrolador para poder ejecutar su función. Dentro de las opciones disponibles se encuentran los protocolos I²C, SPI o UART. La opción del I²C es interesante ya que usará únicamente dos líneas de comunicación: SDA para datos y SCL, para la señal de reloj. De esta forma, es posible ahorrar pines del microcontrolador, aunque, dado el número de ellos que se van a usar, esto no va a suponer un problema.

2.5.2 Elección del display

De cara a ser coherente con la metodología de bajo consumo que se está llevando a cabo en el resto del proyecto, se propone el uso de un panel OLED, cuyo consumo es muchísimo menor que el que pueda tener, por ejemplo, un panel de 7 segmentos. El display debe llevar un driver que active los diferentes LEDs que componen los segmentos del panel. En este caso, se ha optado por el modelo SH1106 [17] que funciona como driver de este tipo de paneles y permite la comunicación mediante I²C.

Para hacer funcionar esta etapa, simplemente hay que implementar un código que permita que se envíen mediante este protocolo los datos que se han recibido desde el sensor para, mediante un botón pulsador, hacer que el driver actúe y muestre la información en pantalla. Este código se expone en el **Anexo A** junto con el resto de la programación del dispositivo.



Figura 22 Panel OLED usado en el sistema

2.6 Software de diseño de PCB

El software de diseño que se va a emplear es el CAD de Cadence conocido como EAGLE. Este programa asocia un archivo con extensión *.sch* (*schematic* o esquemático) a un archivo de formato *.brd* (*board* o placa). Dentro del esquemático se puede realizar el esquema de diseño del circuito seleccionando los componentes concretos que va a incluir la PCB final. Estos componentes se ven reflejados en el archivo *.brd*, en el cual, la huella de los componentes se muestra con la dimensión real que tendrán en la PCB final. Esto permite que se puedan realizar cálculos y estimaciones correctas del tamaño de la PCB y del espaciado entre los diferentes elementos (pads, agujeros, vías, serigrafías, etc.)

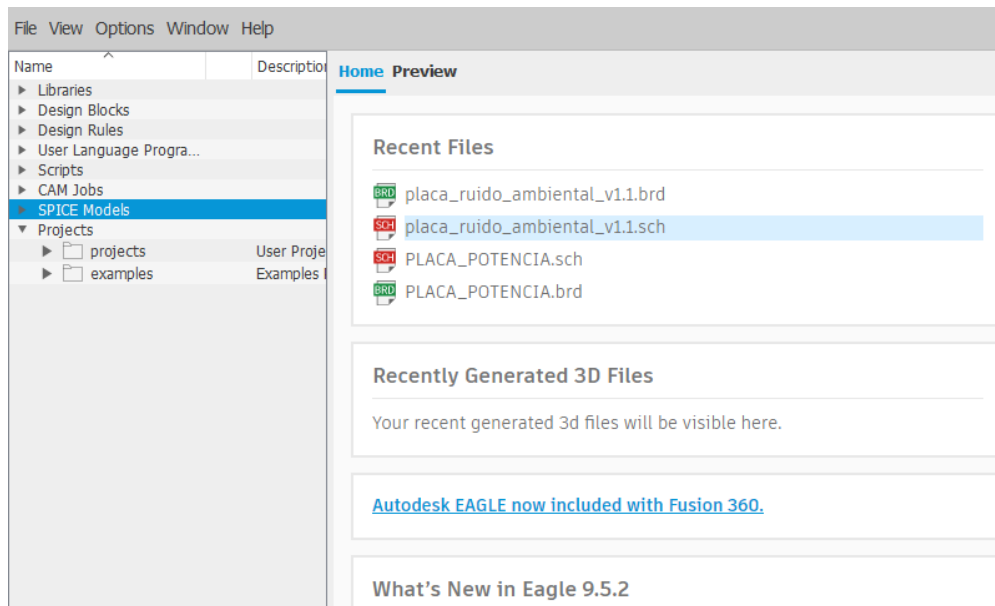


Figura 23. Pantalla de inicio del Software CAD Eagle v9.5.2

Los componentes se componen de un símbolo y una huella, y se implementan en el programa en forma de librerías (archivo *.lbr*). El mismo software incluye gran cantidad de librerías con la mayoría de los dispositivos electrónicos existentes, tanto de inserción (thru-hole) como superficiales (SMD); además, permite la creación manual de nuevas librerías para dispositivos no incluidos en las librerías propias del programa.

De cara a fabricar la PCB diseñada, el programa permite integrar los denominados *Design Rules Check* (Comprobación de las reglas de diseño), [18] con los que se puede comprobar que la PCB cumple con las especificaciones que delimita el fabricante.

Una vez el diseño esté completo, se generan unos archivos CAD llamados *.gbr* (*Gerber*) en el que se muestran las diferentes capas de una PCB (en las caras top y bottom pues el cobre, máscara de soldadura, serigrafía, etc).

Estos archivos CAD son los que necesita el fabricante para realizar su cometido.

2.7 Horno de soldadura para componentes SMD

El horno de soldadura es una herramienta óptima para la realización de prototipos con montaje superficial de componentes SMD a una cara. Otra herramienta muy útil para conseguir este tipo de acabado en prototipos son las estaciones de soldadura infrarroja de

componentes SMD, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Para el presente desarrollo se ha utilizado el horno modelo T-962 de la empresa *SMTHouse* mostrado en la siguiente figura: **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 24. Horno de soldadura T-962 (Fuente: <http://www.smtnet.com/>)

El horno es un calentador infrarrojo que funciona de forma automática mediante control por microprocesador. Puede ser utilizado también para corregir juntas o retirar componentes. Las especificaciones concretas son:

- Área efectiva de soldadura: 180x235mm
- Potencia: 800W
- Ciclo de proceso: 1-8min
- Rango de temperatura: 100-350°C

El procedimiento para realizar el montaje de los componentes es el siguiente:

- Elegir un perfil de calentamiento regulado o configurar uno nuevo según las especificaciones de la pasta de soldadura del que se dispone.
- Aplicar pasta de soldadura sobre los contactos de la placa en crudo. Si posee una plantilla *stencil*, ajustar la plantilla sobre la placa y dejarla fija para luego aplicar con una espátula la pasta.
- Colocar cada componente en su lugar, guiándose del diseño y el programa.
- Abrir bandeja del horno, colocar de forma centrada la placa y proceder a activar el horno.

2.8 Hojas de características de componentes

En este apartado se van a indicar los componentes más importantes que componen el sistema de tele-medición semiautónomo de ruido ambiente.

2.8.1 Etapa de alimentación y almacenamiento de energía

Una vez se han mencionado los componentes clave relacionados con la adquisición y envío de datos, (microcontrolador [4], sensor de ruido MEMS [12] y módulo de SigFox [15]) se van a detallar a continuación las características de los elementos del sistema que garantizarán la correcta gestión de la energía para que el sistema pueda estar permanentemente funcionando de la forma que se requiere.

La idea es que el sistema funcione tomando energía directamente de la red eléctrica ya que se va a incorporar a farolas de alumbrado público. Para ello se va a usar una toma de USB para conectarlo a un cargador que vaya directo a los 230V de la red.

La principal ventaja que presenta la red de alumbrado público es su gran cobertura geográfica, cuestión que facilita la tarea en la elección del emplazamiento del sensor dentro de una urbe. Su principal inconveniente es que, durante el día, la toma de red eléctrica del alumbrado público no está activa, por lo que el sistema se debe alimentar desde otra fuente externa. Para solventar este inconveniente, se va a emplear una batería. El dimensionamiento de la misma, así como los cálculos relacionados con el consumo, se mostrarán en el apartado *Procedimiento Experimental* apartado 3.2.3.1: *Cálculos y requisitos de energía*.

Por otro lado, la entrada de USB también permite que se le conecte cualquier fuente externa de 5V DC para alimentar el circuito sin ningún problema. Este es un ejemplo que se puede dar cuando se estén realizando pruebas o configurando el dispositivo.

En los momentos nocturnos, cuando la red de alumbrado público está activa, se requiere que el sistema se alimente por medio de la red y a la vez recargue la batería. De esta forma se consigue que el sistema nunca se quede falto de energía y pueda cumplir con su labor durante el día. Para cumplir con este cometido, se ha incorporado una etapa de regulación de carga que se detallará posteriormente en los cálculos pero que está centralizada en torno al chip MCP73831 [19] de la empresa Microchip. Este componente establece una curva de carga para baterías de ion-litio donde la corriente de carga es regulable hasta un máximo de 500 mA y permite un control externo del mismo teniendo en cuenta, por ejemplo, el nivel de carga de la batería conectada al regulador. Del mismo modo, en el apartado 3.2.3.1 se detallará la forma en la que se efectuará el control de la carga.



Figura 25. MCP73831(izquierda) y TCP6300 (derecha) (Fuente: datasheets oficiales)

Otras de las características más reseñables del componente se encuentran resumidas en la siguiente tabla:

Tensión entrada	$V_{DD} \text{ (min)} = 3.75V$ $V_{DD} \text{ (máx)} = 6V$
Tensión Regulada de Salida	$V_{REG} = 4.2 \text{ V (típico)}$
Regulación de Línea	0.09 %/V
Regulación de Carga	0.05%
Corriente De Regulación de Carga (salida)	$I = 0.505 \text{ A (típico)}$

Tabla 5. Propiedades principales del MCP73831

La regulación de línea expresa la capacidad de un regulador de mantener la tensión de salida en su valor nominal variando la tensión de entrada en los rangos admitidos. Se

define como $\frac{(\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}})}{V_{in}}$. En este caso, el regulador únicamente va a estar alimentado a 5V, lo que quiere decir que, para dicho valor de tensión de entrada, la variación de tensión de salida va a ser de 18.9 mV.

Por otro lado, La regulación de carga es una característica importante y expresa la capacidad de una fuente de mantener constante el voltaje de salida independientemente de la corriente que se demanda. Es decir, es una muestra de lo estable que es la tensión que ofrece. Se expresa como $\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}}$ por lo que se puede entender como la variación de tensión de salida respecto a dicha tensión, realizando la prueba a diferentes valores de corriente. Un 0.05% es un valor pequeño, y quiere decir que, para 4.2V nominales de salida, la variación de tensión es de 2.1 mV. Por tanto, el regulador ofrece una tensión muy estable, con poca cantidad de *ripple* (rizado de la tensión de salida) . Estos valores son especialmente importantes si se tiene en cuenta la forma de carga de las baterías, en la que los valores de corriente y tensión de salida varían con el tiempo debido a las etapas de corriente constante (CC) y voltaje constante (CV). Esto es lo que se conoce como la curva de carga.

Por otro lado, la alimentación nominal del sistema es 3.3V mientras que la entrada de tensión desde el puerto USB es de 5V, y la batería funciona a 3.7V nominales (siendo el rango completo de tensión desde 2.7V a 4.2V). Debido a este amplio rango de tensiones, se ha procedido al uso de un convertidor reductor elevador (Buck boost) que proporcione una tensión estable de 3.3V a la salida para alimentar al resto de circuitería. La elección de este componente ha sido el TCP63001 de Texas Instruments [20]

El convertidor tiene un rango de entrada de tensiones de 1.8V a 5.5V con una potencia de salida máxima de 4 W, mucho más de lo que requiere el sistema en cuanto a consumo de corriente. Este convertidor está especialmente indicado para aplicaciones que requieran de una única batería de ion-litio, y tal es el caso. Dentro de sus otras características destacables se encuentran:

Corriente máxima de salida	$I_{\max} = 1.2 \text{ A (} V_{\text{in}} = 3.6\text{V a } 5.5\text{V)}$ $I_{\max} = 0.8 \text{ A (} V_{\text{in}} > 2.4\text{V)}$
Eficiencia de conversión	Eff = 96%
Regulación de Línea	0.5 %/V
Regulación de Carga	0.5%
Temperatura	-45° a 80° C

Tabla 6. Propiedades principales del TCP63001

2.8.2 Conectores

La PCB lleva incluida varios conectores, los cuáles cumplen diferentes funciones. En primer lugar, un conector USB, con estándar 2.0, ya que los requisitos de transferencia de datos y de alimentación no son demasiado exigentes. No se pretende enviar grandes cantidades de archivos al microcontrolador, simplemente programarlo y alimentarlo mediante dicho puerto, por lo que el estándar 2.0 es suficiente.

De forma más específica, sí hay que mencionar la conexión sensor-PCB principal. En ambas placas se encuentra un conector de tipo JST de 6 pines: 2 pines para V_{CC} Y GND y los otros 4 pines para las conexiones del protocolo I²S: SCK, MCK, WS y SD. Para ello, se ha optado por una solución del fabricante Amphenol [21], de su serie *FCI-Basics Wire-to-Board Connectors*.



Figura 26. Conector JST de Amphenol para comunicar el sensor con la PCB principal

Por otro lado, además de la entrada de USB se ha incluido un conector de 4 pines común en caso de que se prefiera usar dicho puerto por pines para alguna función concreta, por ejemplo, programación del microcontrolador. El mismo modelo de conector de pines se usará para las conexiones de la pantalla al microcontrolador y para poder programar el módulo TD1208r en caso de que el usuario final lo considere oportuno. Puesto que la pantalla funciona mediante I²C y el módem se programa mediante SWD (*Serial Wire Debug*) en ambos casos no se precisa de más de 4 pines, por lo que se puede aprovechar el mismo conector.

También se ha un conector de 10 pines específico para el acople a un depurador J-TAG. Un depurador es una herramienta que permite corregir o ‘depurar’ pequeños errores que puedan ocurrir dentro del programa objetivo (el programa que va a correr un microcontrolador, por ejemplo). J-TAG hace referencia a *Joint Test Action Group*. Este es el nombre de un puerto creado originalmente para la comprobación de PCBs. Actualmente se usa para acceder al módulo de depuración de la CPU de un sistema. La versión de depurador es específica para la arquitectura ARM. Para programar el SAMD21 se va a utilizar el 8.08.91 de Segger Microcontroller.

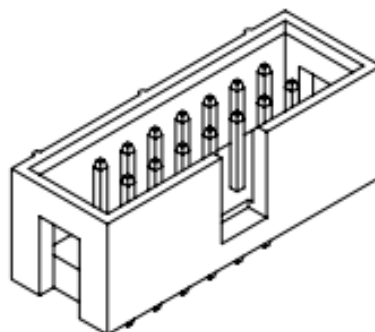


Figura 27. Conector de 10 pines para el depurador

2.8.3 Caja IP67

Dentro de los elementos importantes del sistema no hay que olvidar a la caja en la que irán integrados los diferentes elementos que lo componen: PCB, batería, pantalla y sensor.

Para la aplicación en cuestión es importante que esta sea robusta y permita aislar del exterior al resto del sistema, protegiéndolo de diversos factores como: agua, polvo, viento, etc. Cualquiera de ellos puede dañar fácilmente todos los componentes que integran el dispositivo. Por ello, se va a introducir el sistema en una caja de propósito general con protección al agua y al polvo IP67. Dentro de la variedad de fabricantes disponibles se ha optado por las soluciones de Spelsberg [22]. El motivo principal es porque este fabricante tiene una gran variedad de cajas y, por otra parte, ya ha sido utilizada por con un resultado sobresaliente. El modelo escogido es el **TG ABS 88-9-to** cuyas dimensiones son de 84 x 82 x 85 mm.

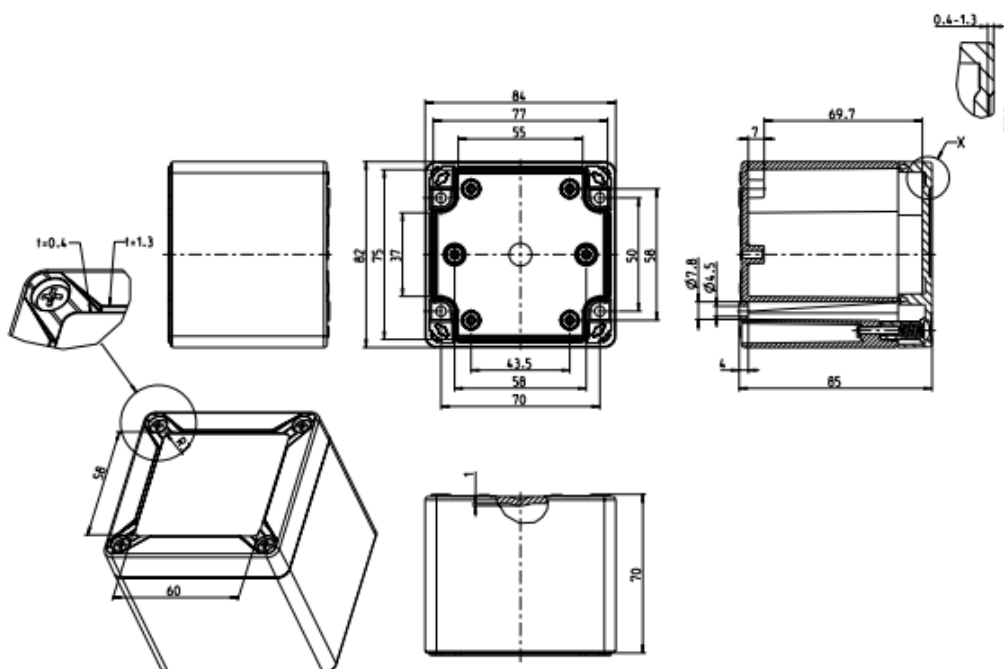


Figura 28. Plano de la caja IP67 (Fuente: datasheet y página oficial)

Aunque la placa principal puede ir colocada de dos formas dentro (paralela y perpendicular al eje de simetría horizontal que el lector puede intuir mirando la imagen del plano), la superficie interior máxima disponible es de 74 x 54 mm, por lo que estas van a ser las dimensiones máximas de la PCB principal. Así pues, la placa irá fijada a la caja mediante separadores con rosca de sujeción. Cabe destacar que, tanto la batería como la pantalla ocupan cierto espacio dentro de la caja, por lo que el tamaño ha sido un factor a tener en cuenta a la hora de elegir dichos componentes, siendo 88 mm de ancho suficientes para embutir los diferentes componentes dentro de la caja.

2.9 Normativa para medidas de parámetros de ruido ambiental

Actualmente la normativa acerca de ruido ambiente y emisiones acústicas se basa en la Ley 37/2003, los reales decretos R.D. 1513/2005 y R.D. 1367/2007 que derivan de ella, y en el Decreto Andaluz 6/2012. En el primero de ambos Reales Decretos se desarrolla la ley en materia de gestión y evaluación del ruido ambiente, mientras que en la segunda se definen índices de ruido y de vibraciones, sus aplicaciones, efectos y molestias sobre la población y su repercusión en el medio ambiente. El Ministerio de Medio Ambiente y la Junta de Andalucía definen en estas normas los indicadores de ruido para ofrecer información acerca del nivel de calidad acústica en el territorio español.

La Ley 37/2003 aporta que *“se define la contaminación acústica como «la presencia en el ambiente de ruido o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que implique molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, incluso cuando su efecto sea perturbar el disfrute de los sonidos de origen natural, o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente”*

Por su parte, en los R.D 1513/2005 y 1367/2007 aparecen definidos una serie de índices acústicos y los valores límites que pueden alcanzar. Algunos de estos índices son L_d , L_e , L_n , y L_{den} , correspondientes a los niveles de ruido equivalente ponderados en los períodos mañana, tarde, noche y total del día, respectivamente. Estos valores quedan definidos de forma más detallada en el Capítulo IV del R.D. 1367/2007. Por su parte, en el R.D 1513/2005 aparecen recogidas dichas definiciones de forma escueta y se plantean las expresiones matemáticas que calculan estos índices de forma intuitiva, quedando estas formalmente expuestas y detalladas en el R.D. 1367/2007:

$$L_x = 10 * \log \sum_i 10^{(L_{eq,T,i} + A_i)/10}$$

x = mañana, tarde o noche

i = índice de la banda de frecuencia

A_i = Corrección de la ponderación de clase A

$$L_{den} = 10 * \log \frac{1}{24} (12 * 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_n+10}{10}})$$

Para definir los períodos de mañana, tarde y noche se definen períodos de 12 horas para el día, 4 para la tarde y 8 para la noche. Según el R.D. 1513/2005 se usa la *ponderación A* recogida en la Norma ISO 1996-2:1987.

Por otro lado, en el mismo R.D se clasifica el territorio español en sectores, en función del ruido que emiten. Principalmente se divide en las siguientes zonas:

- a) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.
- b) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.
- c) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.
- d) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en el párrafo anterior.
- e) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica.
- f) Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte, u otros equipamientos públicos que los reclamen.
- g) Espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.

La importancia de dividir el suelo de esta forma es que, tal y como se dice en el Artículo 5 del R.D. 1367/2007, “*Ningún punto del territorio podrá pertenecer simultáneamente a dos tipos de área acústica diferentes. La zonificación del territorio en áreas acústicas debe mantener*

la compatibilidad, a efectos de calidad acústica, entre las distintas áreas acústicas y entre estas y las zonas de servidumbre acústica y reservas de sonido de origen natural, debiendo adoptarse, en su caso, las acciones necesarias para lograr tal compatibilidad.”

Por tanto, a la hora de implantar el dispositivo en una zona concreta hay que conocer las características de dicha zona. En este caso, al estar en la vía pública el dispositivo funcionará correctamente de la forma en la que se ha planteado. Sin embargo, en un suelo industrializado se deberían tener en cuenta otras consideraciones.

Cabe señalar que el sistema no busca obtener índices acústicos, sino obtener información del ruido ambiente para que, tomando las medidas oportunas, se puedan controlar los niveles de ruido en los puntos donde se instale el dispositivo.

El R.D. 1513/2005 en su Anexo 5 define la altura a la que se deben tomar las mediciones acústicas, la cual está comprendida entre 1.5 y 4 metros. Esta información se amplía en el Decreto Andaluz 06/2012 donde se especifica que la zona óptima de implantación debe ser a partir de 1.5m de altura, y al menos a 1.5m de cualquier ventana o pared que pueda perturbar las condiciones de medida. De esta forma, la altura de colocación de sensores estará comprendida entre 1,5 y 4 metros en el punto de iluminación escogido.

Una vez cumplidos estos requisitos, y a partir de la toma de datos del dispositivo, se podrá comprobar la evolución de los niveles en las zonas alrededor del dispositivo.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción al Sistema

A lo largo de la memoria se han ido comentando los diferentes aspectos a considerar para el desarrollo hardware. Éstas se van a ver implementadas en dos PCB: una placa principal en la que se centralizan las comunicaciones junto a las etapas de potencia y control, y otra PCB auxiliar que incluirá el micrófono y sus conexiones.

La PCB principal junto con la batería y la pantalla estarán dentro de la caja IP67, mientras que el micrófono estará fuera de la caja dentro de un conector de goma con protecciones. La estructura final se puede ver en la siguiente figura de manera esquematizada.

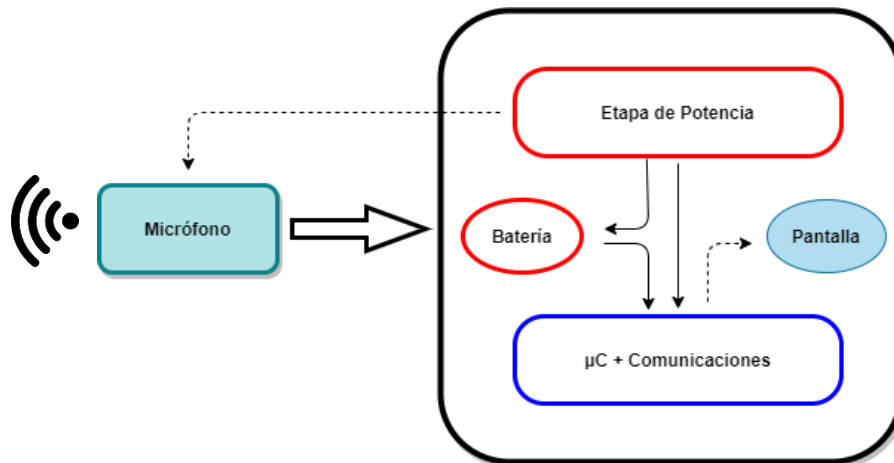


Figura 29. Diagrama representativo del sistema

3.2 Desarrollo del programa en entorno Arduino

El programa que dará vida al dispositivo toma como base el que se incluyó en la anterior versión, por parte del Dr. Sales. En esta nueva versión se amplía el rango de capacidad de funcionamiento del dispositivo, obteniendo datos como el nivel de la batería, además de adaptar el código a la pantalla OLED. Para ello se han modificado las librerías (archivos .cpp y .h) necesarias para hacer funcionar el display, haciéndolas específicas para el uso que se le va a dar. Las modificaciones que se han realizado se muestran en el **Anexo A**.

El programa completo se encarga de ejecutar las siguientes operaciones:

- **Gestionar la toma de datos recogidos por el micrófono:** se evalúa un rango de frecuencias dentro del espectro audible para calcular los valores promedios en intervalos de tiempo de 1 segundo, 1 minuto y 10 minutos.
- **Medición de nivel de la batería:** mediante la incorporación de un algoritmo en el código que ofrece una estimación entre el 0 y el 100% de carga a partir de la medida del ADC del microcontrolador.
- **Data logger:** guarda un registro de los datos del sensor.
- **Transmitir los datos:** permite el envío del paquete de datos cada diez minutos a la red de SigFox.

3.2.1 Estructura y funcionalidad

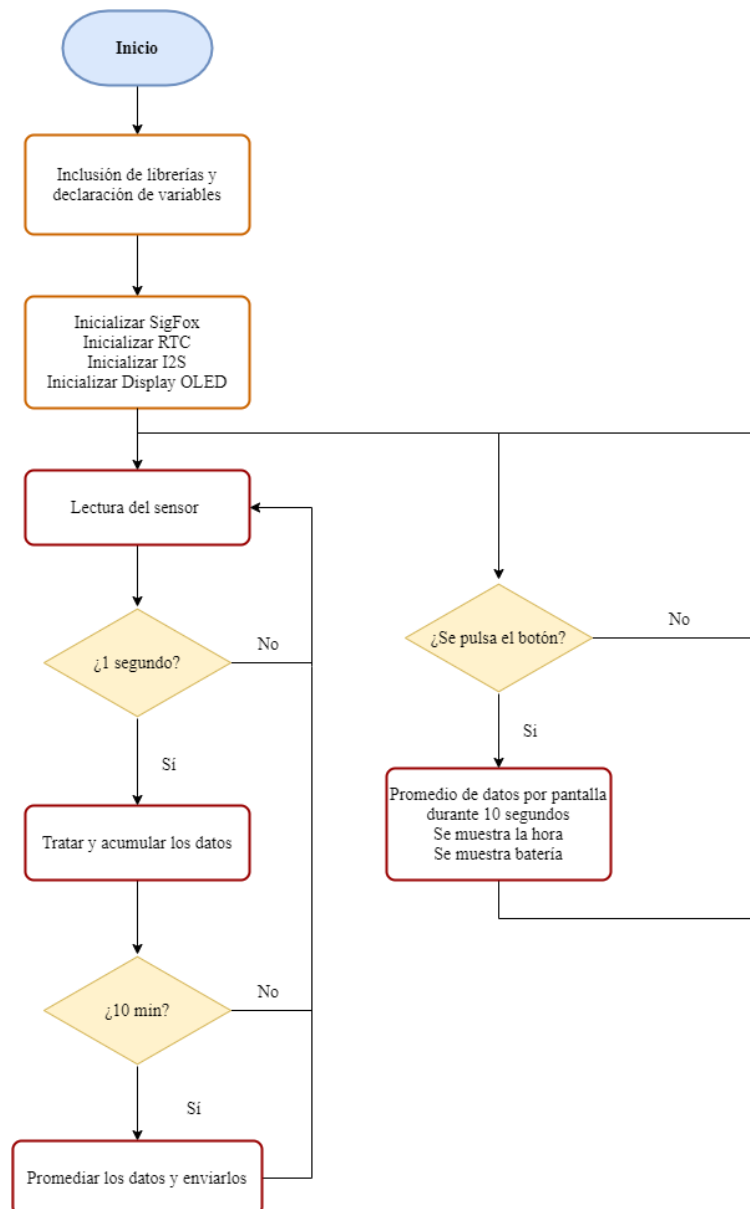
En esta memoria se van a mostrar las mejoras que se han realizado en el código. Puesto que el código original, sobre el que se han hecho las modificaciones pertinentes, fue fruto del trabajo de otras personas, no se ha incluido el mismo de forma completa. Sin embargo, sí se va a explicar su funcionamiento.

El código tiene una pestaña principal con las funciones setup y loop, además de las pestañas adicionales que contienen los principales bloques de funcionamiento del programa: “Alarm.h”, “DataLogger.h”, “Settings.h”, “Display.h”, “NoiseSensor.h”, “Transmission.h”.

- “*Settings.h*”: Declaración de librerías, configuración de pines y declaración de variables globales y funciones adicionales.
- “*Alarm.h*”: Programación de los tiempos empleados para cada tarea. Existe una alarma para la adquisición de datos, para el tratamiento de los mismos y para el envío.
- “*DataLogger.h*”: Registra los datos minuto a minuto.
- “*Display.h*”: Configuración primaria de la pantalla
- “*NoiseSensor.h*”: Ejecución de las funciones esenciales de tratamiento de los datos recibidos por el sensor.
- “*Transmission.h*”: Se encarga de establecer la conexión con la plataforma SigFox para el envío de datos.

La función setup contiene la llamada a las funciones para la inicialización de diversas variables, entre ellas, las relacionadas con el sensor y la transmisión por SigFox.

En la función loop se ha definido la secuencia que seguirá el dispositivo durante su funcionamiento, llamando a diversas funciones definidas en las pestañas anteriormente explicadas. Para mayor comprensión, el bucle de funcionamiento se muestra en el siguiente diagrama de flujo.



3.3 Diseño del sistema de telemedición de ruido ambiente

El diseño de las PCB que conforman el sistema es uno de los puntos clave en este proyecto, y como tal se va a detallar a continuación.

3.3.1 Placa específica para el sensor

La PCB en la que estará soldada el sensor de ruido debe ser de tamaño pequeño ya que va a quedar insertada dentro de una probeta conectada externamente a la caja. El sensor se alimenta a 3.3V. Dicha tensión se obtendrá a partir de la etapa de potencia/batería. Tanto esta entrada de alimentación, como la referencia de tensiones (GND) y las señales

que permitirán enviar datos hacia el microcontrolador (SCK, SD y WS) se realizarán a través de un conector JST como el expuesto anteriormente en el apartado 2.8.2 *Conectores*.

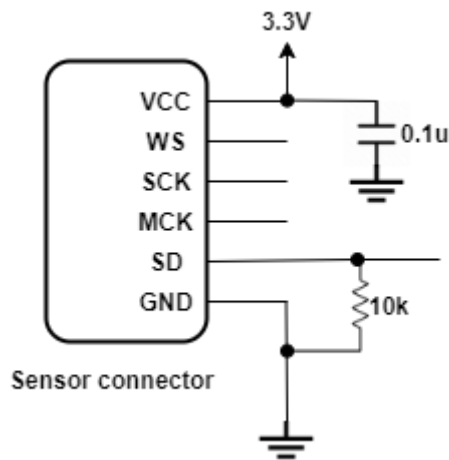


Figura 30. Representación de las conexiones de la PCB específica del micrófono

Dentro de la circuitería necesaria para el funcionamiento del sensor, únicamente hay que destacar una resistencia de pull-down de 10kOhm para la salida de datos, SD, ya que la hoja del fabricante indica explícitamente que esta salida de datos pasa a salida tri-estado cuando no se están enviando datos. De esta forma, se consigue descargar la línea en esos momentos.

Por otra parte, para garantizar que la alimentación sea lo más estable posible y de esta forma mejorar el rendimiento y se eviten errores, se ha colocado un capacitor de 0.1uF cerámico de desacople en el pin de alimentación del sensor.

3.3.2 Etapa de recepción-envío de datos y control

Dentro de la PCB principal se encuentran las etapas de comunicación de datos y control, y la etapa de potencia. En este caso se va a tratar la primera.

Esta etapa se compone por los siguientes elementos:

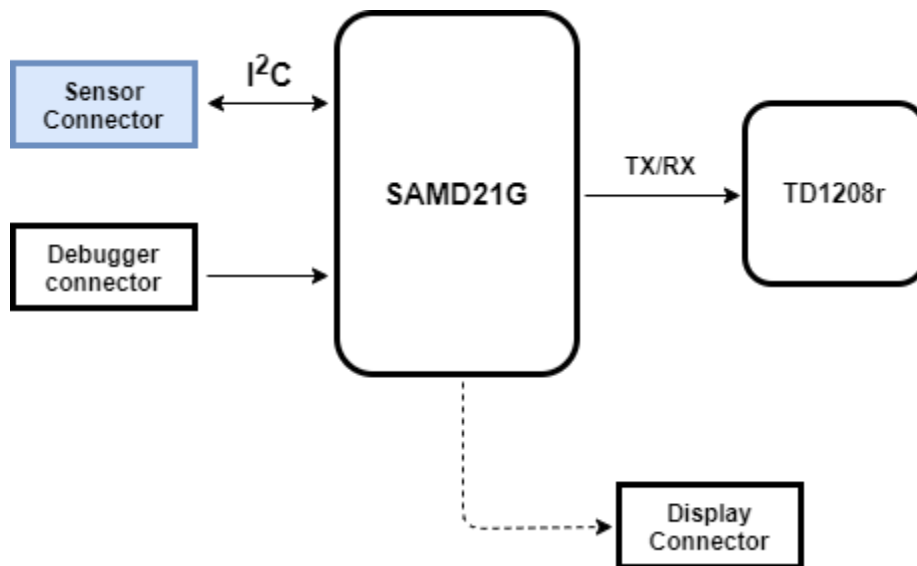


Figura 31. Elementos principales de la PCB de comunicación

El bloque principal lo componen el microcontrolador (SAMD21G) y el módulo de recepción y envío de datos SigFox (TD1208r). Estos elementos son la base del funcionamiento de todo el sistema, y como tal, requieren de circuitería específica para garantizar su buen funcionamiento.

En ambos componentes se han usado condensadores de 0.1uF en cada una de las entradas de alimentación que disponen para desacoplar dichas entradas y filtrar ruidos.

Concretamente hablando del SAMD21G, se dispone de un par de pines al que irá conectado un cristal de cuarzo de 32.768 kHz junto con dos condensadores necesarios para su funcionamiento. El fabricante da una recomendación acerca de qué valor de capacidad escoger para los condensadores de desacople del cristal de cuarzo. Concretamente indica que sea mayor de 15 pF.

Sin embargo, para la correcta elección de estos componentes se debe atender a la capacidad intrínseca del cristal mediante la siguiente expresión:

$$C_L = \frac{C_{cap}}{2} + C_{pin} + C_{shunt}$$

donde C_L es la capacidad del cristal, C_{cap} es el valor de capacidad de los condensadores de desacoplo, C_{pin} es la capacidad de los pines del microcontrolador conectados al cristal y C_{shunt} es la capacidad de la unión. Estos dos últimos valores están definidos en las hojas del fabricante del microcontrolador y del cristal de cuarzo como:

$$C_{pin} = 3.05 \text{ pF} + 3.29 \text{ pF}$$

$$C_{shunt} = 1.2 \text{ pF}$$

Además de ello, se dan indicaciones para la elección del cristal en función de la resistencia en serie equivalente (ESR), donde se especifica que para un valor de capacidad de 12.5 pF, esta no debe superar los 313kOhm. Con estos datos se ha optado por el cristal *ABS07 32768Hz* de *Abracon LLC* [23] :

ABS07	
Frecuencia (f)	32.768 kHz
Capacidad de carga (C_L)	12.5 pF
Capacidad de shunt (C_{shunt})	0.9-1.2 pF
Resistencia serie (ESR)	70 kOhm

Tabla 7. Características principales del cristal de cuarzo

Teniendo estos datos se puede calcular la capacidad de los condensadores de desacoplo:

$$C_{cap} = 2 * (C_L - C_{pin} - C_{shunt}) = 2 * (12.5\text{pF} - 3.05\text{pF} - 3.29\text{pF} - 1.2 \text{ pF})$$

$$= \mathbf{9.92 \text{ pF}}$$

Es decir, un valor de capacidad como tal para los capacitores garantizaría un buen funcionamiento del cristal. Debido a ello, el valor mínimo recomendable es de 10pF, ya que es el valor más próximo al calculado. Sin embargo, la tolerancia de dichos condensadores debe ser lo más baja posible, de un 1% como máximo. Es por ello que es recomendable establecer un margen de seguridad de un 25%, de forma que la tolerancia del componente no provoque que su valor real quede por debajo del mínimo exigido. Teniendo esto en cuenta, el valor mínimo con margen de seguridad sería de:

$$9.92 \text{ pF} * 1.25 = 12.4 \text{ pF}$$

El valor comercial más+ próximo es el de 15 pF.

Además, el SAMD21 dispone de una entrada de tensión analógica (VDDANA) necesaria para la alimentación del ADC/DAC, que incorporará protecciones más allá del condensador de 0.1uF. En este caso se usará un filtro con ferrita que permita eliminar la mayor cantidad de ruido electromagnético de alta frecuencia para conseguir que dicha alimentación analógica sea lo más estable posible y que la compatibilidad electromagnética (EMC) sea adecuada. Esto es lo que se conoce como supresor de EMI (*Electro-Magnetic Interference*). La ferrita junto con un condensador de 10uF forman un filtro LC de segundo orden paso bajo, favoreciendo la atenuación de las frecuencias elevadas. Sabiendo que las impedancias de la ferrita y el condensador se calculan como:

$$Z_L = 2\pi fL$$

$$Z_C = 1/2\pi fC$$

Y siendo f la frecuencia de la señal entrante, se obtiene una atenuación dependiente de dicha frecuencia:

$$V_{in} = \frac{Z_C}{Z_C + Z_L} * V = \frac{1/2\pi fC}{1/2\pi fC + 2\pi fL} * V$$

Suponiendo una ferrita con una impedancia nominal de 600 ohm a los 100MHz y el condensador de 10uF anteriormente mencionado, una onda de 100MHz se vería atenuada en un factor de:

$$V_{in} = \frac{1/2\pi fC}{1/2\pi fC + 2\pi fL} * V_{100\text{ MHz}} =$$

$$\frac{1.591 * 10^{-4} (Ohm)}{1.591 * 10^{-4} (Ohm) + 600(Ohm)} * V_{100\text{ MHz}}$$

$$= 2.653 * 10^{-7} * V_{100\text{ MHz}}$$

Usando este cálculo como referencia, para voltajes con frecuencia de 1MHz la atenuación sería de $2.5*10^{-3}$, es decir, disminuye su amplitud en un factor de 2500.

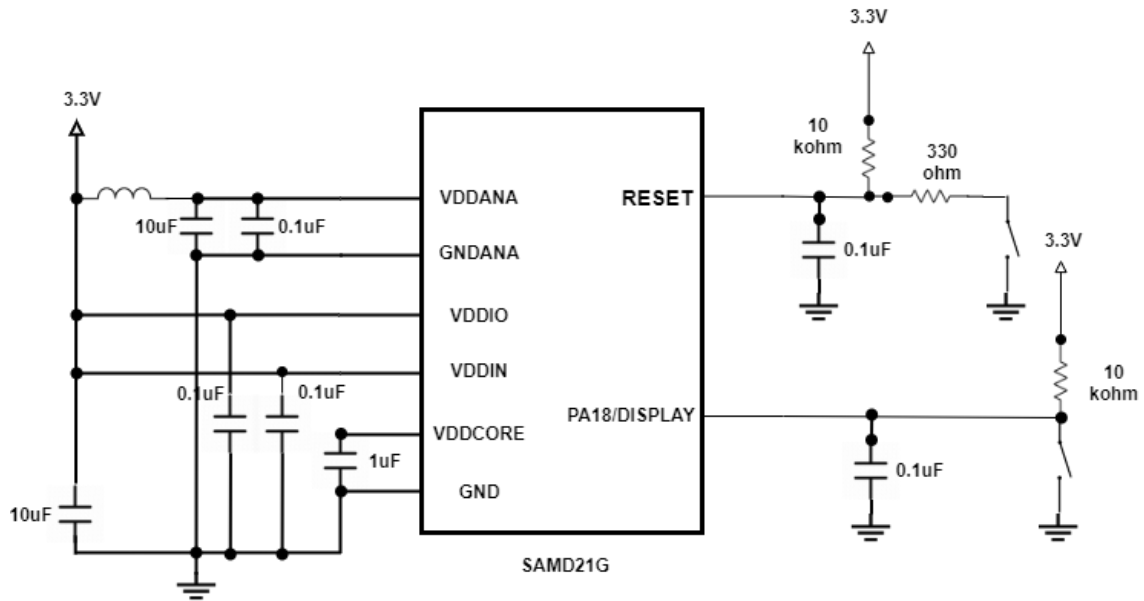


Figura 32. Conexiones de alimentación y RESET en el SAMD21G

Estos valores de ferrita y condensador permiten atenuar considerablemente el ruido externo.

Por otro lado, tal como se puede ver en la Figura 30, hay dos pulsadores, donde el primero funciona como RESET del microcontrolador y el segundo se usa para cambiar el contenido que se muestra por pantalla.

En el caso del módulo de SigFox, se han conectado una serie de capacitores de desacople en cada una de las entradas de alimentación del módulo, así como un botón de RESET.

Como particularidades, cabe destacar la implementación de un conector coaxial para la antena de SigFox, conectada al pin específico para ella, así como un diodo supresor de tensión transitoria (TVS) con el que se tratarán de evitar picos de tensión producidos por las señales entrantes hacia la antena. Este diodo se ha elegido de forma que su tensión de bloqueo (V_{clamp}) sea de 6V, ya que el valor máximo que aguanta el módem es de 6.5V. De esta forma se evitan daños en el módem.

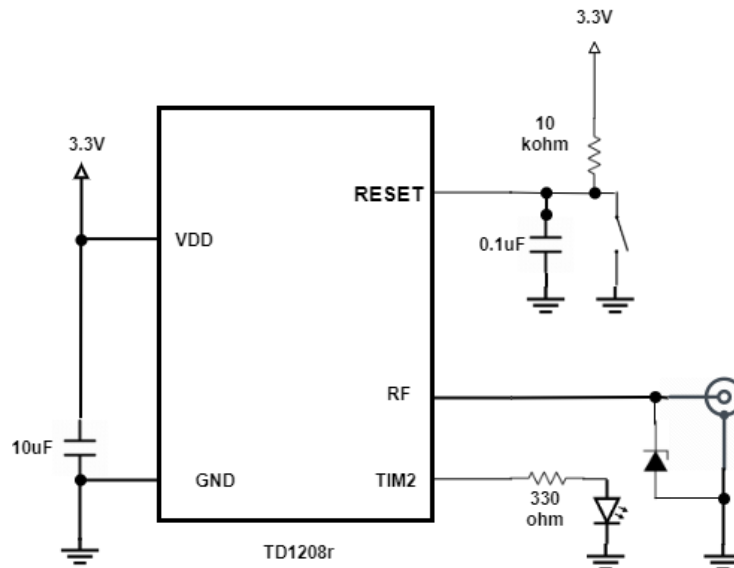


Figura 33. Conexiones de alimentación y auxiliares del TD1208r

Además, el módulo incorpora un pin de salida que proporciona una señal relacionada con su TIMER interno, y permite que se pueda usar como PWM para alimentar un LED y poder ver información acerca del estado del módulo como, por ejemplo, el bootloader cuando se está iniciando.

Para finalizar con los elementos que componen la etapa de comunicaciones de la PCB principal, queda comentar las conexiones entre los módulos y los conectores que se encuentran en la misma.

Para empezar, desde el puerto USB llegan las señales USB+ y USB- hacia los pines 33 y 34 del microcontrolador. Estas conexiones se usarán para la programación de este. Desde la etapa de alimentación también llega al pin 7 del microcontrolador la señal de *BAT_LEVEL*, correspondiente al valor de tensión que tiene la batería en ese momento. El pin 7 es uno de los pines analógicos que posee el SAMD21. La información de la batería se podrá recomponer mediante software.

Desde el conector usado para la depuración llegan las conexiones SWDIO y SWCLK a los pines 30 y 31, habilitados para esta función. Igualmente, para dejar abierta la posibilidad de programar el módem SigFox, se conectan sus pines DB2 y DB3 correspondientes a las señales SWDIO y SWCLK a su conector de 4 pines particular.

El micrófono se comunica con el microcontrolador usando los pines SCK, SD y WS correspondientes al protocolo I2S. Para ello, se emplea un conector JST de 6 pines tanto en la placa del micrófono como en la del microcontrolador. Dichas conexiones van a los pines 12,15, 16 y 19.

Para comunicar el microcontrolador con el módem se va a usar el protocolo UART, ya que este es el método de comunicación preferente para según el fabricante del mismo. Para ello, se va a hacer uso de los pines 37 y 38 del micro, TX y RX respectivamente. Por último, las conexiones de la pantalla irán en los pines 13 y 14 del microcontrolador, ya que es una de las parejas de pines habilitadas para I²C.

Por destacar algunas particularidades, el SAMD21G ofrece dos canales para el protocolo I²S, cada uno compuesto por 4 conexiones, tal y como se ha explicado anteriormente. A la hora de elegir los pines adecuados del microcontrolador se ha dado la circunstancia de que, a pesar de tener disponibles varios canales de I²C, el número de ellos se quedó reducido a 2 debido a que coincidían con alguna de las líneas de los canales del I²S utilizadas para la comunicación

3.3.3 Etapa de potencia y alimentación

Una vez se han comentado las características de la etapa de comunicación y control del dispositivo, únicamente queda explicar la etapa de alimentación que se ha diseñado para aportar energía al resto del conjunto.

Como ya se ha comentado en anteriores puntos, el sistema puede tomar su alimentación a través del puerto USB, bien desde la propia red eléctrica (pasando previamente por un cargador) o desde una fuente externa de 5V, o bien desde la batería que tendrá conectada. En el próximo punto se expondrán los casos de estudio para el diseño de la etapa de potencia del sistema, así como las consideraciones que se han tenido en cuenta y los requisitos de energía.

Para poder diseñar esta etapa ad-hoc fue necesario determinar la forma en la que el sistema va a funcionar.

La alimentación externa proveniente de la red eléctrica únicamente podrá ser aprovechada durante las horas nocturnas, por lo que se necesita de otra fuente externa que pueda proporcionar energía eléctrica durante las horas diurnas. De esta forma, se ha decidido usar

una batería de ion-litio para ello, ya que, como se mostrará más adelante, supone la mejor relación tamaño/coste/precio. También se deja abierta la posibilidad de alimentar el dispositivo de forma externa mediante una fuente de DC de 5V, aunque en condiciones normales, la situación de alimentación del circuito se va a dar por la pareja ‘red eléctrica-batería’.

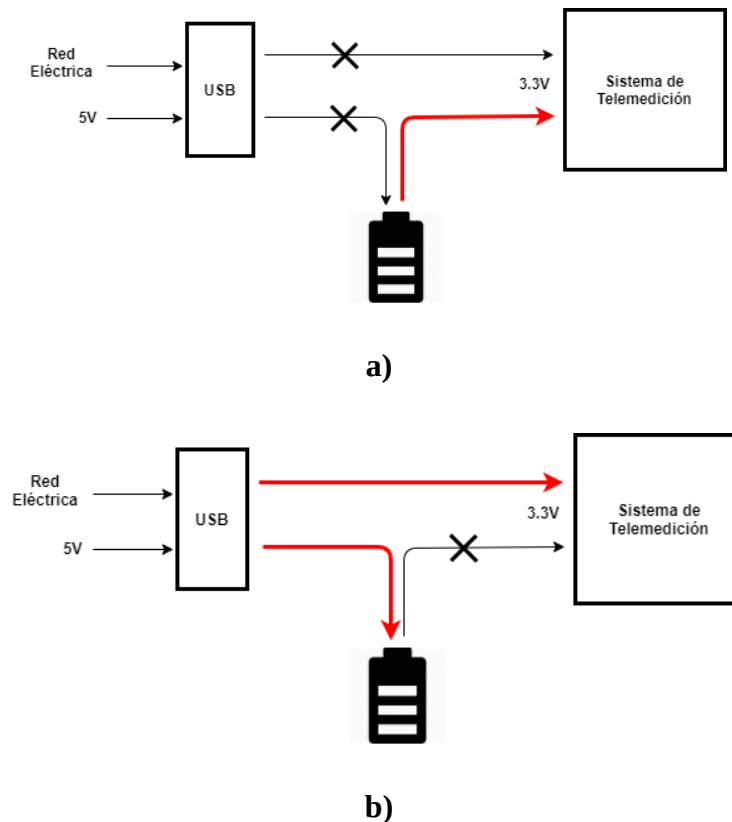


Figura 34. Esquema de funcionamiento de la etapa de carga y alimentación. a) durante el día. b) durante la noche

La ventaja que supone el uso de la red de alumbrado público, de la cual se puede extraer corriente de forma ‘ilimitada’¹, es que durante los períodos nocturnos se va a hacer uso de la misma para proveer de energía al sistema a la vez que se recarga la batería. De esta forma se evita que el dispositivo se quede sin alimentación. El dimensionamiento de la carga y la batería tendrá en cuenta este hecho para que nunca llegue a producirse un ‘run-out’. (agotamiento)

3.3.3.1 Cálculos y requisitos de energía

En primer lugar, hubo que definir las tensiones de alimentación de los diferentes componentes que forman parte de la circuitería del sistema. Ya se ha hablado de cada uno de ellos en anteriores apartados y se podría resumir en que ha sido necesario realizar una conversión a 3.3V desde los 5V de entrada o desde la tensión que esté proporcionando la batería en ese momento.

Además de ello, fue necesario conocer los requisitos de corriente de los componentes para saber qué demanda energética se iba a producir. Se puede deducir el consumo total del sistema a partir de la suma del consumo independiente máximo de cada uno de los componentes principales.

Los elementos que deben estar funcionando permanentemente y que son los encargados de drenar la mayor cantidad de corriente serán aquellos que forman la etapa de comunicación y control: microcontrolador, módulo de SigFox y micrófono, sin olvidar la pantalla.

Se puede definir el consumo de corriente como:

$$I_{Total} = \sum I_k,$$

donde k hace referencia a un elemento individual dentro del sistema y que consume corriente.

Para hacer un cálculo más exhaustivo de dicho consumo se realizará un análisis que tiene en cuenta elementos secundarios, como pueden ser los pulsadores de RESET cuando son activados o la corriente que requieren los diferentes LEDs que se encuentran presentes en el sistema. De esta forma, la expresión final para el cálculo de la corriente total que demandará el sistema vendrá dado por:

$$I_{Total} = (I_{\mu C} + I_{SigFox} + I_{sensor} + I_{pantalla} + I_{secundario}) * 1.15$$

El factor de un 15% extra se introduce para tener en cuenta algún consumo de corriente parásito o algún consumo excesivo que se pueda dar de manera excepcional. Es un factor de sobredimensionamiento para garantizar la seguridad del conjunto en todo momento.

Para empezar, se hablará del consumo del microcontrolador. En su hoja de características se observa cómo se divide entre el consumo de la CPU y de los periféricos. El valor en funcionamiento normal de los mismos (el modo en el que va a funcionar en el dispositivo) es de 10mA para la CPU y de 1.2mA aproximadamente para los periféricos, obtenido de sumar el consumo individual de los periféricos mostrados en la Figura 33.

Table 36-11. Typical Peripheral Current Consumption

Peripheral	Conditions	Typ.	Units
RTC	$f_{\text{GCLK_RTC}} = 32\text{kHz}$, 32bit counter mode	7.4	μA
WDT	$f_{\text{GCLK_WDT}} = 32\text{kHz}$, normal mode with EW	5.5	μA
AC	Both $f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable both COMP	31.3	μA
TCx ⁽¹⁾	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable + COUNTER in 8bit mode	50	μA
TCC2	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable + COUNTER	95.5	μA
TCC1	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable + COUNTER	167.5	μA
TCC0	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable + COUNTER	180.3	μA
SERCOMx. I2CM ⁽²⁾	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable	69.7	μA
SERCOMx. I2CS	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable	29.2	μA
SERCOMx. SPI	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable	64.6	μA
SERCOMx. USART	$f_{\text{GCLK}} = 8\text{MHz}$, Enable	65.5	μA
I2S ⁽³⁾	$f_{\text{GCLK_I2S_0}} = 12.288\text{MHz}$ with source FDPLL with $f_{\text{FDPLL}} = 49,152\text{MHz}$	26.4	μA
DMAC ⁽⁴⁾	RAM to RAM transfer	399.5	μA

Figura 35. Desglose de los periféricos con su consumo nominal asociado (Fuente: datasheet oficial)

El siguiente elemento es el módulo de SigFox. De forma nominal, su consumo es de 3.45 mA para la CPU.

Sin embargo, cuando se producen envíos de datos, este eleva su consumo a 42 mA como máximo .

Teniendo en cuenta que el módem envía datos cada 10 min, se puede hacer una media de lo que va a consumir durante 1h. Es necesario recordar que la tasa de transferencia de bits de SigFox es de 100-600 bps. Estos datos tardarían en enviarse unos 6-7 segundos.

Si se producen 6 envíos de datos en 1h, donde cada uno dura 7 segundos, quiere decir que en una hora hay un consumo de 41mA durante 42 segundos, mientras que existen 3558 segundos en los que va a consumir, como máximo, 3'45 mA. Se puede estimar el consumo medio de corriente durante 1 hora como:

$$\bar{I} = \frac{41mA * 42 s + 3'45 mA * 3558 s}{3600 s} = 3.87 \frac{mAs}{s} = 3.87 \frac{mAh}{h} = 3.87 mA \text{ de media}$$

El micrófono es un elemento que demanda muy poca corriente, debido a su fabricación MEMS. Su consumo es de 1.5mA máximos alimentado a 3.3V.

Por otro lado, se encuentra la pantalla que se va a utilizar. Según su hoja de características, el consumo del total del panel es de 27 mA por lo que se va a tomar este valor como referencia. Cabe la posibilidad de usar un panel de mayor tamaño, como por ejemplo de 128x128, aunque el aumento de consumo del sistema no sería demasiado significativo. Debido a que se dispone del panel de 128x64, se va a usar este como referencia.

En el dispositivo se incluirán dos diodos LED, uno para verificar el encendido y otro para ver la recepción y envío de datos SigFox. Cada uno consume 5 mA en conducción.

Si se suman los consumos de todos los elementos mencionados hasta ahora, se obtiene un valor de 53.57 mA.

Sin embargo, existen más elementos en el sistema que se van a tener en cuenta. Conforme el lector avance en esta memoria sabrá de qué forma se van a usar estos componentes. De momento se van a exponer los consumos de cada uno según sus especificaciones. La corriente que demandarán los elementos secundarios del circuito vendrá dada por:

$$I_{secundaria} = I_{MOSFET} + I_{switch} + I_{diodos} + I_{regulador} + I_{buffer} + I_{comparador} \\ + I_{selector} + I_{convertidor}$$

Observando las hojas de características de estos componentes se puede obtener el consumo necesario de cada uno para su funcionamiento:

Elementos	Número de componentes en la PCB	Consumo individual	Consumo máximo de corriente
MOSFET	2	1 mA + 1.37 mA	2.37 mA
Switches	3	0.3 mA	0.9 mA
Diodos	2	0.8 mA	1.6 mA
Regulador	1	1.5 mA (MÁX.)	1.5 mA
Buffer	1	1 uA	1 uA
Comparador analógico	1	0.3 mA	0.3 mA
Selector de fuente	1	90 uA	90 uA
Convertidor de tensión	1	50 uA	50 uA
		TOTAL	6.881 mA

Tabla 8. Consumos de elementos secundarios del sistema

Por tanto, a los 53.57 mA iniciales hay que añadirle la corriente que demandarían los componentes que se acaban de analizar, lo que daría un total de **60.451 mA**.

Este valor es un valor orientativo para el diseño de la etapa de potencia.

La batería no va a alimentar a estos elementos secundarios, pero sí hay que tenerlos en cuenta para calcular la máxima tasa de carga que la fuente externa va a suministrar.

Es evidente que todo lo que se ha mencionado no funcionará siempre al mismo tiempo. Por ejemplo, la pantalla mostrará información cuando se active su pulsador correspondiente. Al igual que los transistores y otros componentes que se activarán cuando la ocasión lo requiera. Pero es importante establecer límites máximos para dimensionar el resto de la etapa sin que haya ningún inconveniente.

Suponiendo un margen de seguridad de un 15%, el consumo nominal podría llegar de manera puntual a **69.51 mA**.

Sin embargo, teniendo en cuenta el funcionamiento discontinuo de la pantalla, el consumo medio será bastante menor. En un período de 1h donde la pantalla se encienda 10 veces

(hecho altamente improbable ya que el dispositivo estará en la vía pública sin ningún mantenimiento personal) el consumo de corriente medio sería de **26.45 mA**. Esto quiere decir que la carga de la batería se va a ir reduciendo a una tasa de 26.45 mAh, alcanzando un máximo de 60.45 mA (con un 15% de margen) en un caso extremo en el que la pantalla permanezca encendida todo el día.

A partir de estos datos se puede entrar a valorar la capacidad de la batería que se va a utilizar.

El puerto de entrada externo será un USB estándar 2.0, que permite una corriente máxima de 500 mA [24].

Cuando el módulo de SigFox envíe datos, se producirán picos de consumo de 113.36 mA, cuando la pantalla esté en pleno funcionamiento. Es por ello que, durante la noche, cuando el dispositivo funcione a la vez que se esté recargando la batería, la corriente de carga no puede superar un valor de:

$$500 \text{ mA (USB)} - 113.36 \text{ mA de pico} = 386.64 \text{ mA}$$

Este límite marca la corriente máxima que se puede programar en el regulador que recarga la batería.

Al estar anclado a una farola, el sistema de recarga se activará cuando se inicie el encendido del alumbrado público.

Como recoge la Guía Técnica de Iluminación y Alumbrado Público:[25]

Las instalaciones de alumbrado exterior funcionan en un periodo máximo comprendido entre la puesta del sol y su salida o cuando la luminosidad ambiente lo requiera..

Según esta consideración, el peor caso posible ocurre cuando el día tiene el mayor número de horas posible. Este hecho se produce en el solsticio de verano. Las horas diurnas alcanzan su máximo anual y, por tanto, las nocturnas alcanzan su mínimo. Al ser el día en el que más tiempo debe actuar la batería y menos horas de carga van a estar disponibles, se va a dimensionar la etapa de potencia en base a estos límites.

Para conocer los momentos de salida y puesta de sol se ha tomado como referencia la ciudad de Cádiz, el 21 de junio de 2020.

Se ha visitado el sitio web del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, y más concretamente el Instituto Geográfico Nacional [26]. Dentro de la diferente información que ofrece, existe una base de datos con información geográfica de cualquier localización española, donde aparece además el alba y el ocaso. En el solsticio de verano, el sol sale a las 7:07h de la mañana y se pondrá a las 21:47h de la tarde, lo que proporciona 14:40h de sol. Quiere decir que dicho día tendrá 9:20h de noche.

CADIZ		SALIDA Y PUESTA DE SOL PARA 2020												Observatorio Astronómico Nacional			
Latitud y longitud: 36 31 23, - 6 16 58		Hora oficial en la península y Baleares												Instituto Geográfico Nacional			
Año 2020														Ministerio de Fomento, España			
Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem.	Octubre	Noviemb.	Diciemb.					
Ort	Ocas	Ort	Ocas	Ort	Ocas	Ort	Ocas	Ort	Ocas	Ort	Ocas	Ort	Ocas	Ort	Ocas	Ort	Ocas
h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m
1	837 1820	827 1850	755 1920	811 2048	731 2114	708 2138	711 2147	732 2131	757 2053	821 2008	749 1828	819 1810					
2	837 1821	826 1852	754 1921	809 2049	730 2114	708 2139	711 2147	732 2130	757 2051	821 2007	750 1827	820 1809					
3	837 1822	826 1853	753 1922	808 2049	729 2115	708 2139	712 2147	733 2129	758 2050	822 2005	751 1826	821 1809					
4	837 1822	825 1854	751 1923	806 2050	728 2116	707 2140	712 2147	734 2128	759 2048	823 2004	752 1825	821 1809					
5	838 1823	824 1855	750 1924	805 2051	727 2117	707 2141	713 2147	735 2127	800 2047	824 2002	753 1824	822 1809					
6	838 1824	823 1856	748 1925	804 2052	726 2118	707 2141	713 2147	736 2126	801 2045	825 2001	754 1823	823 1809					
7	838 1825	822 1857	747 1926	802 2053	725 2119	707 2142	714 2146	736 2125	801 2044	826 1959	755 1822	824 1809					
8	838 1826	821 1858	746 1927	801 2054	724 2120	707 2142	714 2146	737 2124	802 2042	826 1958	756 1822	825 1809					
9	837 1827	820 1859	744 1927	759 2055	723 2121	707 2143	715 2146	738 2122	803 2041	827 1957	757 1821	826 1810					
10	837 1828	819 1900	743 1928	758 2055	722 2121	706 2143	716 2145	739 2121	804 2040	828 1955	758 1820	826 1810					
11	837 1829	818 1901	741 1929	756 2056	721 2122	706 2144	716 2145	740 2120	805 2038	829 1954	759 1819	827 1810					
12	837 1830	817 1902	740 1930	755 2057	720 2123	706 2144	717 2145	741 2119	805 2037	830 1952	800 1818	828 1810					
13	837 1831	816 1903	738 1931	754 2058	720 2124	706 2144	717 2144	741 2118	806 2035	831 1951	801 1818	829 1810					
14	837 1832	815 1904	737 1932	752 2059	719 2125	706 2145	718 2144	742 2117	807 2034	832 1950	802 1817	829 1811					
15	836 1833	814 1905	736 1933	751 2100	718 2126	706 2145	719 2143	743 2115	808 2032	833 1948	803 1816	830 1811					
16	836 1834	813 1906	734 1934	750 2101	717 2126	706 2145	720 2143	744 2114	808 2031	834 1947	804 1816	831 1811					
17	836 1835	812 1907	733 1935	748 2101	716 2127	707 2146	720 2142	745 2113	809 2029	834 1946	805 1815	831 1812					
18	835 1836	810 1908	731 1935	747 2102	716 2128	707 2146	721 2142	745 2112	810 2028	835 1944	806 1814	832 1812					
19	835 1837	809 1909	730 1936	746 2103	715 2129	707 2146	722 2141	746 2110	811 2026	836 1943	807 1814	832 1812					
20	835 1838	808 1910	728 1937	744 2104	714 2130	707 2147	722 2140	747 2109	812 2025	837 1942	808 1813	833 1813					
21	834 1839	807 1911	727 1938	743 2105	714 2130	707 2147	723 2140	748 2108	812 2023	838 1941	809 1813	833 1813					
22	834 1840	806 1912	725 1939	742 2106	713 2131	708 2147	724 2139	749 2107	813 2021	839 1939	810 1812	834 1814					
23	833 1841	804 1913	724 1940	741 2107	712 2132	708 2147	725 2138	749 2105	814 2020	840 1938	811 1812	834 1814					
24	833 1842	803 1914	722 1941	739 2108	712 2133	708 2147	725 2138	750 2104	815 2018	841 1937	812 1811	835 1815					
25	832 1843	802 1915	721 1942	738 2108	711 2133	708 2147	726 2137	751 2103	816 2017	742 1836	813 1811	835 1816					
26	831 1844	801 1916	719 1942	737 2109	711 2134	709 2147	727 2136	752 2101	816 2016	743 1835	814 1811	836 1816					
27	831 1845	759 1917	718 1943	736 2110	710 2135	709 2147	728 2135	753 2100	817 2014	744 1834	815 1810	836 1817					
28	830 1846	758 1918	717 1944	735 2111	710 2136	709 2147	728 2134	753 2058	818 2013	745 1832	816 1810	836 1818					
29	829 1847	757 1919	815 2045	734 2112	709 2136	710 2147	729 2133	754 2057	819 2011	746 1831	817 1810	837 1818					
30	829 1848		814 2046	732 2113	709 2137	710 2147	730 2133	755 2056	820 2010	747 1830	818 1810	837 1819					
31	828 1849		812 2047		709 2138		731 2132	756 2054		748 1829		837 1820					
h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m

Figura 36. Datos del Instituto Geográfico Nacional (Fuente: <https://www.mitma.gob.es/salidapuestasol/2020/Cadiz-2020.txt>)

Es decir, con una tasa de reducción de carga de 81.47 mAh/h, el total perdido por la batería durante las horas diurnas será de:

$$\frac{60.45 \text{ mAh}}{h} * 14.67 \text{ h} = 886.80 \text{ mAh}$$

Por otro lado, durante la noche este nivel de carga debe recuperarse, y de ningún modo se puede superar los 386.64 mA de tasa de carga. Teniendo en cuenta la cantidad de horas nocturnas disponibles, la corriente mínima necesaria para recargar la batería debe ser de:

$$\frac{886.80 \text{ mAh}}{9.33 \text{ h}} = 95.05 \text{ mA}$$

Por tanto, la corriente de carga debe estar comprendida entre [95.05 mA, 386.64 mA]. Es decir, usando 500 mA va a ser posible recargar la batería durante la noche mientras se alimenta el sistema si se mantiene la corriente de carga de la batería dentro de ese intervalo.

Por último, conociendo estos valores, queda escoger una batería para la aplicación. Como se explicará en el siguiente punto, la idea es mantener la batería en un estado de salud óptimo durante un largo período de tiempo, y para ello es importante mantenerla en un nivel de carga de entre un 30-80%. Eso quiere decir que el nivel de carga máxima perdida de 886.80 mAh se debe corresponder como mínimo con un 50% de la capacidad máxima de la batería. Por tanto, la capacidad mínima debe de ser de 1773.6 mAh.

Por cuestiones de disponibilidad de material, se ha tomado como referencia una batería de ion-litio de la marca *PIRABADI* de 2800 mAh de capacidad. Esta batería estaba dentro del equipamiento del laboratorio de la Escuela y fue cedida para su uso.

Uno de los objetivos que se han pretendido lograr fue que la carga de esta nunca llegue al 100%, ya que al ser una aplicación que estaría un tiempo prolongado en la vía pública, se requería que la salud de la misma se mantuviese en el tiempo.

Tal y como se puede ver en la Figura 37, el ciclo de vida de una batería de ion litio aumenta significativamente manteniendo los niveles de carga en torno a un 30-75%, en vez de llevarlo al 100%. [27] Por ello, es una buena práctica dejar de cargar la batería cuando esta alcanza un nivel de voltaje de 4V o 4.05V, aunque esto depende de la curva de descarga que tenga la batería. [28]

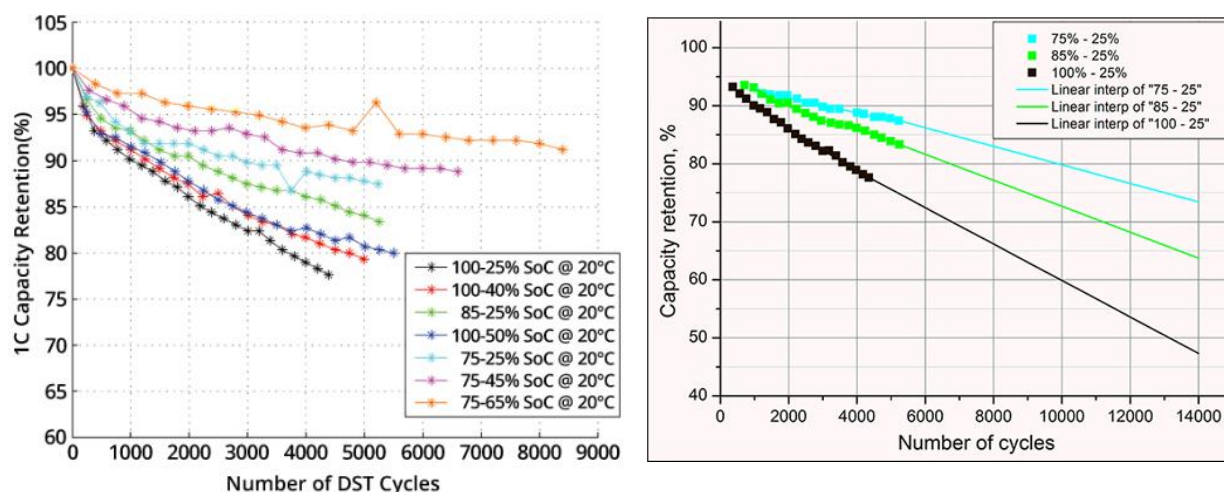


Figura 37. Pruebas de carga y descarga para ver las variaciones en el ciclo de vida de un modelo de batería. Cortesía de **Battery University**

Debido a ello, se ha elaborado una etapa de control de carga. El objetivo de dicha etapa es poder definir el límite superior del SoC (State of Charge) que va a alcanzar la batería al recargarse.

Debido a la falta de información que proporciona el fabricante acerca de la batería 'Parabadi 2800mAh 18650', se va a suponer que esta alcanza un valor de carga próximo a un 80% cuando el voltaje de la misma está en 4V.

Aunque no hay disponible una curva OCV (Voltaje en circuito abierto) vs SOC (Estado de carga) para afirmar este hecho rotundamente, sí se ha podido observar en diferentes ensayos de diferentes baterías de características similares a la que se va a usar (capacidad nominal parecida, tensión nominal de 3.7V, tensión máxima de 4.2V, etc) que en valores muy próximos al 80% de carga se alcanza un valor de tensión de 4V. Por ejemplo, en pruebas con bancos de baterías de mismas características [29] se observa como al 80% de capacidad de carga, la tensión de la gran mayoría de celdas se encuentra en 4V.

De hecho, usando el programa Matlab/Simulink se ha simulado una serie de baterías con estas características, variando ligeramente algunos parámetros. Para ello se ha usado el modelo *Battery* existente en Simulink, perteneciente a la librería *Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electric Drives/ Extra Sources*. El modelo se rige fundamentalmente por las siguientes ecuaciones:

$$f(it, i^*, i) = E_o - k * \frac{Q}{Q - i^*t} * (i + it) + A * \exp(-B * it),$$

para el modelo de descarga ($i^* > 0$)

$$f(it, i^*, i) = E_o - k * \frac{Q}{0.1*Q + i^*t} * i - k * \frac{Q}{Q - i^*t} * it + A * \exp(-B * it),$$

para el modelo de carga ($i^* < 0$)

donde, finalmente, el voltaje de salida sería $V_{Batt} = f(it, i^*, i) - R_i * i$

Estas ecuaciones se corresponden con un modelo eléctrico simple, formado por una fuente de tensión variable y una resistencia interna:

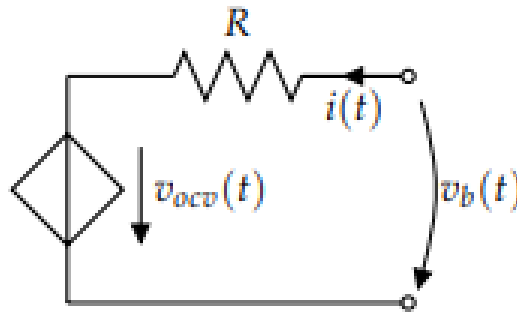


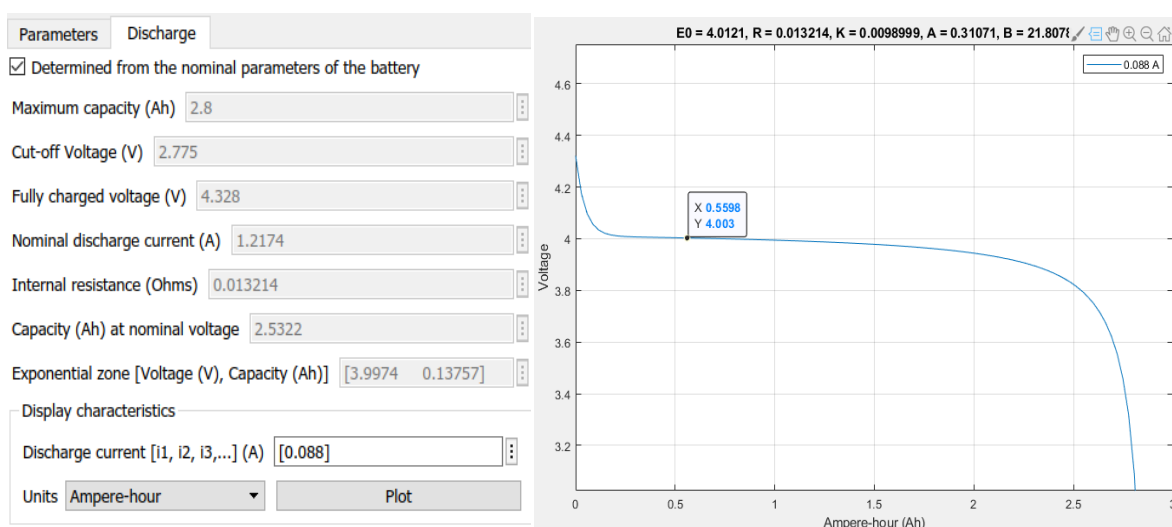
Figura 38. Modelo de circuito equivalente de batería

Realmente, los parámetros de las ecuaciones planteadas serían dependientes de la temperatura, pero en este caso se intenta hacer una introducción al modelo, y no se pretende dar una visión detallada del mismo, con lo que no se ha considerado necesario profundizar en dicha dependencia térmica [30]. La definición de los parámetros que componen las ecuaciones se muestra en la Tabla 9.

E_o	Potencial constante (V)
K	Resistencia de polarización (V/Ah)
i^*	Variación de corriente a baja frecuencia (A)
i	Corriente de la batería (A)
it	Carga extraída de la batería (Ah)
Q	Capacidad máxima de la batería (Ah)
A	Voltaje de etapa exponencial (V)
B	Capacidad de la etapa exponencial (Ah^{-1})

Tabla 9. Parámetros de las ecuaciones que modelan una batería

El modelo de la batería automáticamente ajusta dichos parámetros en función de las propiedades básicas de la batería que se desea modelar: tecnología, capacidad nominal, capacidad máxima, tensión nominal, resistencia interna, etc. Estos valores se obtienen generalmente de la información que aporta el fabricante sobre su producto. Al no disponer de dicha información, se han hecho diferentes pruebas: En primer lugar se han definido los valores de tensión y capacidad nominales y se ha dejado que el programa definiese el resto. El resultado fue el mostrado en las imágenes a) de la siguiente Figura:



a)

Parameters Discharge

☒ Determined from the nominal parameters of the battery

Maximum capacity (Ah) 2.8

Cut-off Voltage (V) 2.7

Fully charged voltage (V) 4.2

Nominal discharge current (A) 1.2174

Internal resistance (Ohms) 0.013214

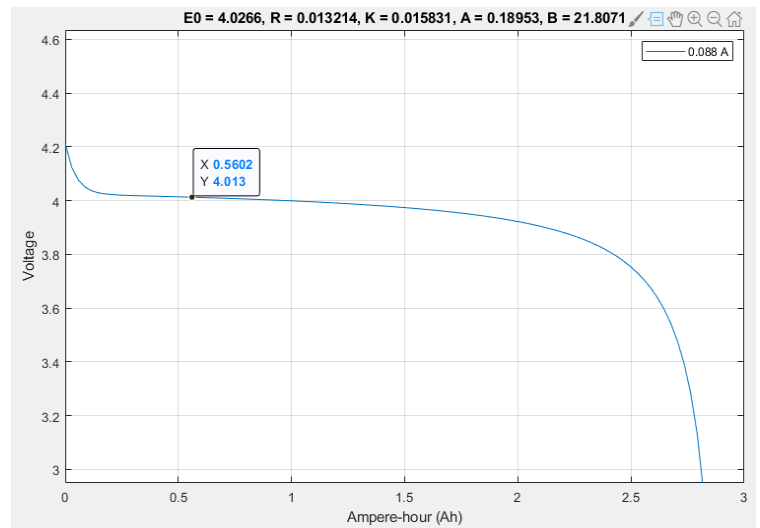
Capacity (Ah) at nominal voltage 2.5322

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] [3.9974 0.13757]

Display characteristics

Discharge current [i1, i2, i3,...] (A) [0.088]

Units Ampere-hour Plot



b)

Parameters Discharge

☐ Determined from the nominal parameters of the battery

Maximum capacity (Ah) 2.8

Cut-off Voltage (V) 2.7

Fully charged voltage (V) 4.2

Nominal discharge current (A) 1.2174

Internal resistance (Ohms) 0.01

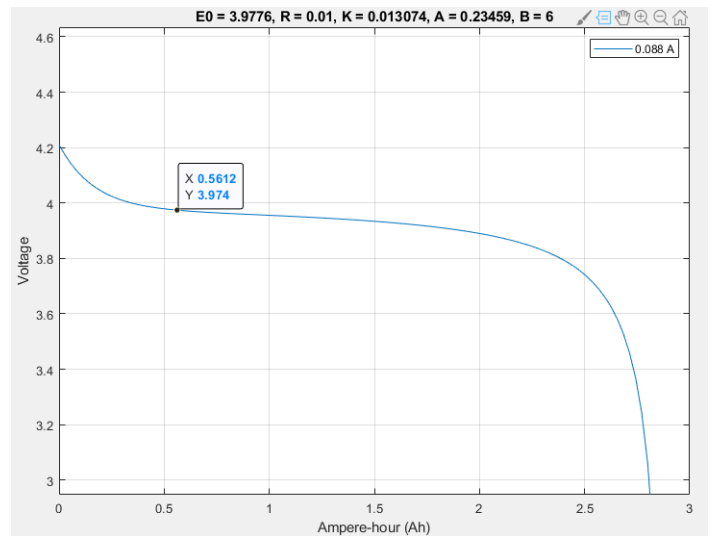
Capacity (Ah) at nominal voltage 2.4

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] [3.95 0.5]

Display characteristics

Discharge current [i1, i2, i3,...] (A) [0.088]

Units Ampere-hour Plot



c)

Figura 39. Diferentes modelos de batería partiendo de los datos principales

El eje de abscisas representa la profundidad de descarga (*Depth of Discharge, DoD*)
 Quiere decir que el 80% de 2800mAh es equivalente a un 20% de DoD.

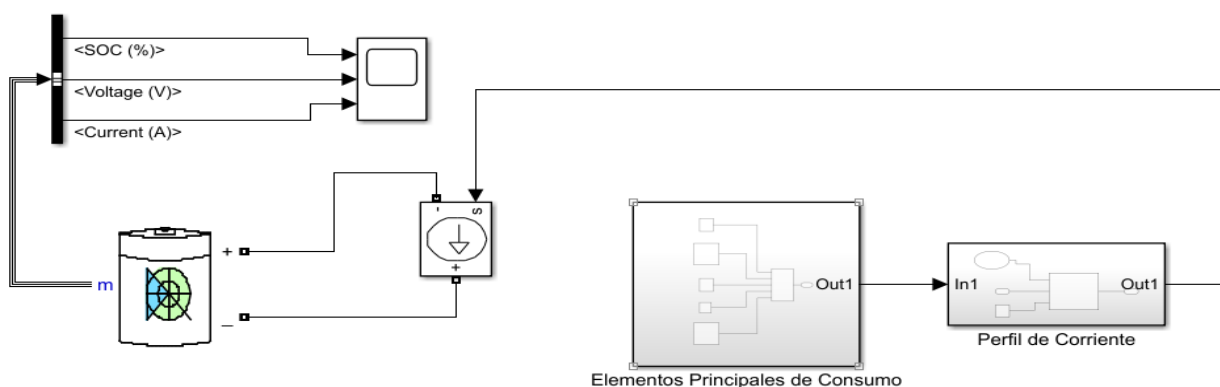
Un 20% de 2800mAh es 560mAh, y tal como se puede ver en la primera imagen de la Figura 39, se corresponden con 4.003V. En la siguiente prueba se modificaron los parámetros de tensión máxima y capacidad al voltaje nominal, en 4.2V y 2.4 Ah, respectivamente. Se pudo apreciar el cambio en la tendencia de la curva, sin embargo se alcanza un valor de 4.012V al 80% de capacidad.

Por último, se varió la resistencia interna y los valores que delimitan la zona exponencial de la curva, que se refiere a la zona inicial de la gráfica donde la tensión cae rápidamente. En la imagen c) se modificó el valor de resistencia interna a 0.01 Ohm, y los valores de la zona exponencial se determinaron en 3.95V y un valor aleatorio de 0.5 Ah. Esto provoca que la zona exponencial dure más y la curva sea más plana, fenómeno que ocurre en algunos modelos de baterías. En este caso el valor de tensión que se consigue con un 80% de capacidad es de 3.974V.

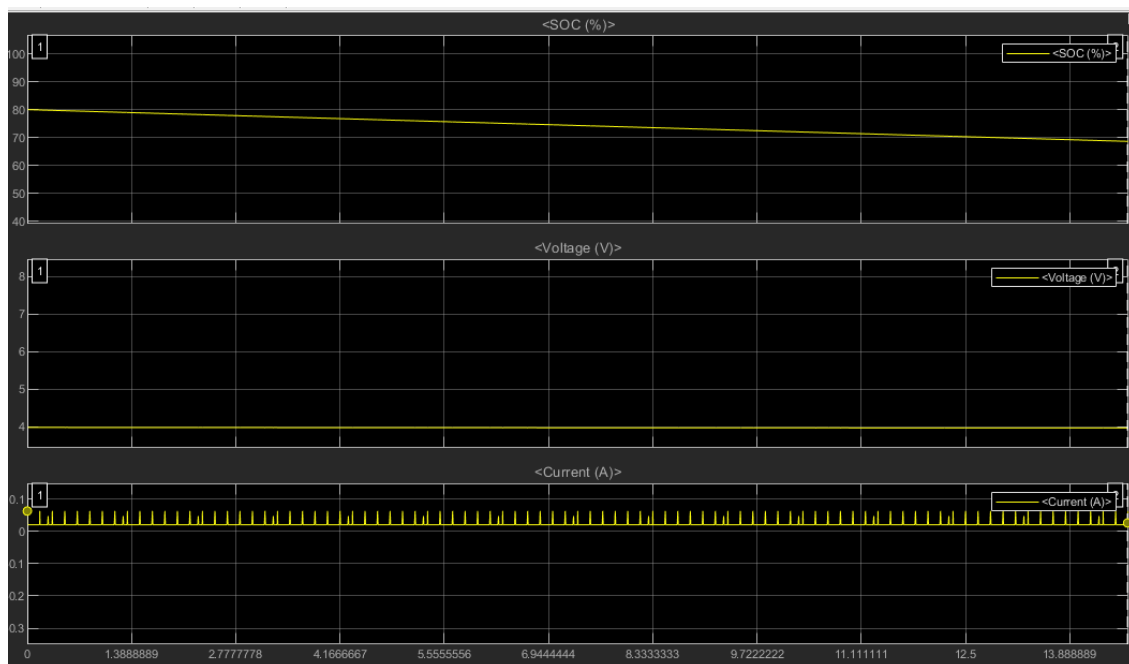
De esta forma, aún sin tener datos oficiales de la batería, se puede suponer que el razonamiento escogido para mejorar la salud de la misma es correcto. Para diferentes escenarios de baterías se alcanzan valores muy similares de tensión en el nivel de carga de interés para el proyecto, aproximadamente del 80%.

De cara a confirmar los valores de corriente calculados, así como para ver el rendimiento de la batería ante algunos escenarios posibles de funcionamiento, se han realizado algunas simulaciones con casos reales. Así se podrá comprobar como varían los niveles de carga y tensión de la batería. Para ello se volvió a recurrir al programa de simulación Matlab/Simulink.

En él se ha modelado la batería igual que anteriormente y se han incluido diferentes elementos que definen la cantidad de corriente que demanda una fuente de corriente en función del tiempo.



a)



b)

Peak to Peak	3.637e-01
Mean	2.312e-02
Median	2.117e-02
RMS	2.581e-02

c)

Figura 40. Simulación de un comportamiento real nominal

Algunos elementos como el módulo de SigFox y la pantalla, demandan corriente de forma periódica, teniendo un consumo base y elevándolo hasta cierto nivel en algunos momentos.

La primera simulación se ha ejecutado para la máxima duración de período diurno, 14.67h. Se obtuvieron los resultados de la corriente demandada a la batería que se puede ver en la imagen c) de la Figura 40.

El valor medio de la corriente es de 23.12 mA. Al no tener ningún margen de seguridad aplicado, cosa que sí se ha tenido en cuenta en los cálculos, este valor equivaldría a $23.12 \text{ mA} * 1.15 = 26.4 \text{ mA}$, valor muy próximo al calculado para la corriente media que consumiría el dispositivo en condiciones normales.

El nivel de carga de la batería se vería reducido un 10% según se observa en la primera gráfica de la Figura b) (SoC).

La siguiente prueba que se realizó, fue establecer la corriente que demandaría la pantalla en su valor máximo, además de incluir la fase de recarga durante la noche.

Haciéndolo de esta forma se observó que el valor medio de corriente se elevó hasta los 53.23 mA (sin factor de seguridad). Lo interesante fue comprobar cuánto tiempo tardaría la batería en volver a tener un 80% de carga. Observando la imagen b) de la Figura 41 se observó que la carga perdida es de un 27.5% (recuadro azul de la imagen b)), y se tardaría en recuperar dicha carga en un promedio 9281 segundos, es decir, 2 horas y 35 minutos (recuadro verde de la imagen b)). Prueba realizada con una corriente de carga de 300 mA.

Peak to Peak	3.892e-01
Mean	5.323e-02
Median	5.165e-02
RMS	5.438e-02

a)

	Time (days)	Value
1	0.611	5.273e+01
2	0.718	8.022e+01
ΔT	9.281 ks	ΔY 2.750e+01

b)

Figura 41. Datos obtenidos de simular para la corriente máxima de demanda

De estas pruebas se pudo deducir que la cantidad de horas nocturnas mínima (9h 20 min) es más que suficiente para recargar la batería, con lo que se puede garantizar el buen suministro de energía al dispositivo.

Por otro lado, en base a los cálculos y las pruebas realizadas, se pudo concluir que la batería no va a alcanzar niveles de carga cercanos al 0%, ni siquiera algo próximo a ello, por lo que no se ha considerado necesario imponer un límite inferior a la descarga de la batería. Este límite se trató de forma teórica en 2.7V (ya que es el valor mínimo de tensión que puede proporcionar la batería) para el dimensionamiento de algunos componentes.

3.3.3.2 Diseño de la etapa de potencia

Durante la noche es cuando la batería se debe cargar a partir de la corriente que se toma desde la red. Para efectuar una carga adecuada para la batería se debe tener en cuenta que las celdas de ion-litio se cargan siguiendo una serie de fases, lo que se conoce como la curva de carga de una batería. En este caso se utilizó un regulador de carga (MCP73831, comentado en el punto 2.8 *Hojas de Características de los componentes*) que es capaz de aplicar esta curva de carga adecuándose a las características de la batería que se va a utilizar.

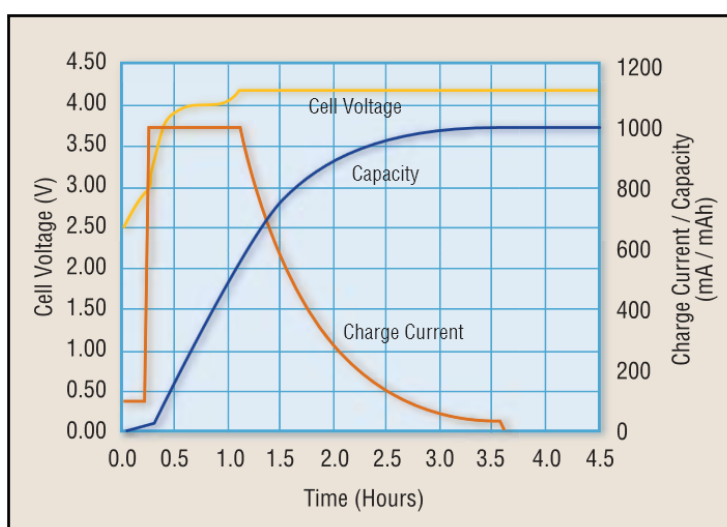


Figura 42. Ejemplo de curva de carga de batería de ion-litio

El funcionamiento es el siguiente: cuando el regulador detecta que hay una fuente de alimentación en su entrada y que existe una batería con un nivel de tensión por debajo de un umbral en su salida, empieza a aplicar el ciclo de carga a la batería. En una primera fase, proporciona una corriente de precarga constante, del 10% de la corriente nominal que va a aplicar en la siguiente fase (Corriente Constante, o CC). Cuando el voltaje de la batería alcanza el valor de tensión de salida del regulador, 4.2 V, se entra en la fase de carga a voltaje constante (CV). La ventaja que ofrece este regulador es que permite controlar la magnitud de la corriente de carga y los momentos en los que se quiere cargar la batería.

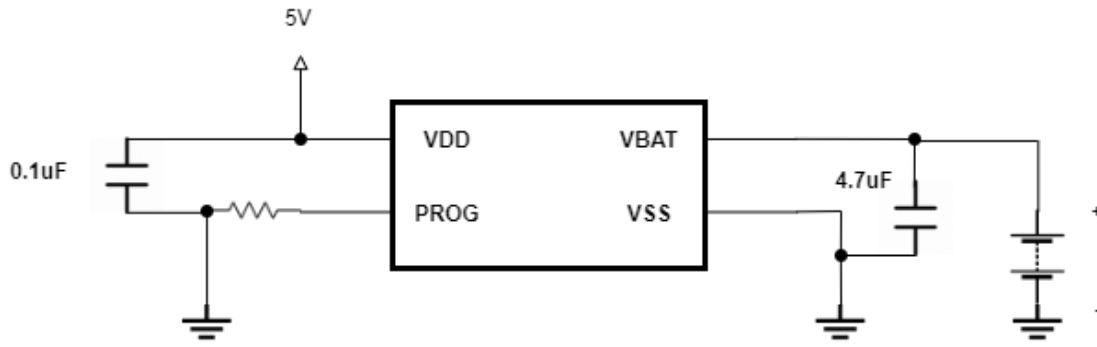


Figura 43. Conexiones básicas del regulador de carga

La clave de estas funciones se encuentra en su pin PROG. En función del valor de resistencia que se coloque entre dicho pin y VSS (referencia de tensión), el regulador cambia la magnitud de la corriente de salida en la fase de CC. La calcula de la siguiente forma:

$$I_{REG}(mA) = \frac{1000 (V)}{R (kOhm)}$$

Por ejemplo, para una corriente de 500 mA de salida, habría que elegir una resistencia de 2 kOhm.

Teniendo en cuenta la corriente mínima de recarga (95.05 mA) necesaria para que la batería recupere su carga perdida, se debe colocar una resistencia de 10.52kOhm entre PROG y VSS. Este valor de resistencia puede llegar hasta 2.58 kOhm, correspondiente a los 386.64 mA de carga máxima permitida.

En este caso, se ha pretendido realizar la carga a 300 mA, de forma que haya margen de maniobra y no se efectúe la carga a la mínima corriente que se permite. Para este valor, la resistencia asociada al pin PROG debe ser de 3.3kOhm.

Además de esta función, si dicho pin se encuentra en alta impedancia o conectado a un nivel lógico alto, éste entiende que no se debe efectuar el ciclo de carga. De esta forma se puede controlar cuando se quiere iniciar el proceso o detenerlo.

A continuación se explicará la etapa diseñada para llevarlo a cabo.

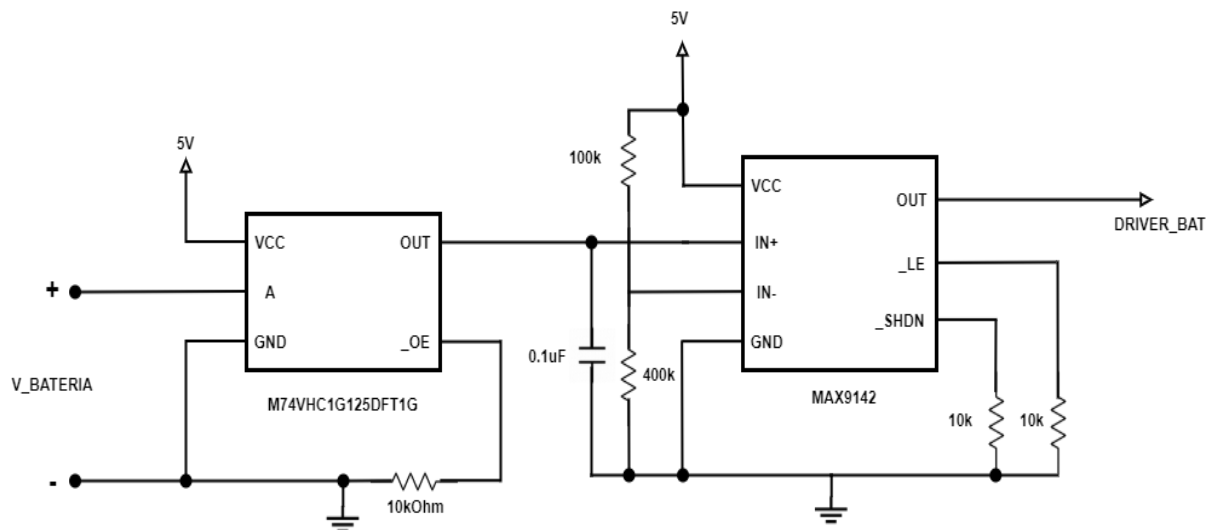


Figura 44. Monitoreo y comparación de la tensión de la batería

En la Figura 44 se muestra el esquemático de la etapa de monitoreo y control de carga.

Primero, es necesario observar el nivel de la batería. Para ello se ha utilizado el M74VHC1G125DFT1G de ON-SEMICONDUCTORS [31]. Este es un *buffer* con el que se puede obtener el nivel de tensión de la batería sin que haya drenaje de corriente. El componente está siempre activo mediante un *pull-down* en su pin de ENABLE. Este pin toma un valor lógico alto cuando la conexión es a *LOW*.

Una vez se mide el voltaje, éste se compara con una referencia de tensión de 4V. Para ello se ha utilizado el MAX9142 de MAXIM INTEGRATED [32]. Este componente es un comparador analógico que proporciona una salida positiva cuando la entrada IN+ supera en valor a la entrada IN-. De esta forma, cuando el voltaje de la batería supere los 4V de referencia que se establecen en el pin IN-, aparece una señal lógica alta en la salida. Sin embargo, en caso de que el voltaje de la batería no supere dichos 4V, se obtendrá un '0' lógico. Para la obtención de los mencionados 4V como referencia, se ha usado un divisor de tensión desde la toma de 5V de la entrada de la etapa de potencia, como se puede ver en la Figura 45.

Estos niveles de tensión altos y bajos son los que van a indicar al regulador los momentos en los que tiene que cargar y los momentos en los que no. Para ello, ha sido necesario diseñar una forma de enviar dichos valores lógicos al pin PROG.

Se ha realizado lo siguiente:

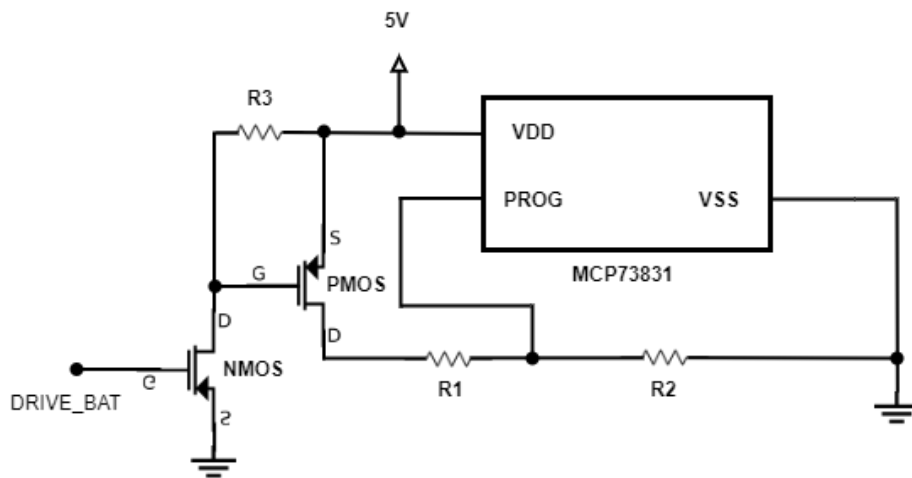


Figura 45. Conexión final del pin PROG

El N-MOS se encarga de invertir la señal de puerta. A esta configuración se la conoce como inversor. Es decir, cuando tiene un '0' lógico en la puerta, su salida es un '1' que se obtiene gracias al *pull-up* hacia 5V en su colector. En el momento en el que la tensión en la puerta del NMOS alcanza valores altos, éste conduce, dando un '0' en su salida.

Por otro lado, la salida del NMOS está conectada a la puerta del PMOS. El primero actúa como driver del segundo. En este caso, cuando se tiene un '0' en la puerta, el PMOS conduce, produciendo un divisor de tensión mediante las resistencias R1 y R2. Este divisor está calculado de forma que el pin PROG vea una tensión alta cuando el transistor conduce.

Sabiendo que R2 es la resistencia que marca el valor de corriente de carga y que se requiere en el pin PROG un valor de tensión alto (4.5V por ejemplo), se calcula R1. Cabe recordar que este '0' viene a su vez de un '1' lógico en la puerta del NMOS, lo que significa que el comparador ha detectado que la tensión de la batería ha superado los 4V de referencia. De esta forma se consigue que se deje de proporcionar carga a la batería cuando alcance el nivel deseado.

Si se tiene en cuenta el otro caso posible (cuando la batería no supera los 4V) se produce una señal de valor lógico alto en la puerta del PMOS por lo que este se corta y no conducirá.

De esta forma, el pin PROG ve únicamente la resistencia R2 conectada a VSS, definiendo la corriente de carga.

Para garantizar que durante esta etapa no se produce ninguna señal errónea que active el PMOS, se ha colocado una resistencia de *pull-down* en la puerta del NMOS. Con ello se consigue que esta conexión esté en 0V hasta que aparezca un nivel alto, provocando que se corten ambos transistores.

Para calcular R1, R2 y R3 ha sido necesario recurrir a las ecuaciones de los MOSFET. Se quiere que la corriente sea lo más pequeña posible para disminuir el consumo. En el caso del NMOS, esta queda definida como:

$$I_{DS,NMOS} = \frac{5V}{R3 + R_{DS}}$$

Puesto que se requiere un nivel lógico bajo al activarse, R_{DS} debe ser pequeño para no elevar demasiado la tensión en la salida. De esta forma se ha elegido el 2N7002 para esta función. Para este transistor, la tensión umbral V_T es de 2.1V. Como V_{DS} es de un valor bajo, se tiene que:

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T < 5V - 2.1V = 2.9V$$

El transistor debe funcionar en la zona óhmica. Según la hoja de características, para valores cercanos a pocos mA, $R_{DS} = 1.4 \text{ Ohm}$. Es decir, para una corriente de I_{DS} de 1 mA, se despeja R3 con un valor de 4.998 kOhm. Se tomará un valor de 5kOhm para la resistencia R3.

Este mismo desarrollo se puede usar para calcular las resistencias R1 y R2. Ya se determinó el valor de 3.3 kOhm para R2 anteriormente.

El transistor PMOS es el SI2371EDS de Vishay y se caracteriza por una R_{on} muy pequeña, al igual que ocurría con el 2N7002. En el caso anterior se explicaron todos los pasos de los cálculos.

Cuando el PMOS conduzca, R1 y R2 formarán un divisor de tensión con salida al pin PROG. Puesto que se quiere un valor de 4.5V en dicho pin, quedaría:

$$\frac{R2}{R1 + R2} * 5V = 4.5V$$

Conociendo que R2 vale 3.3kOhm, hay que despejar R1. Este tendría, finalmente, un valor de 360 Ohm.

Conforme se ha ido explicando esta etapa el lector habrá podido apreciar que la tensión de funcionamiento de estos componentes es de 5V en vez de 3.3V

Estos 5V sólo se tienen dentro del sistema cuando hay una fuente externa alimentándolo. Efectivamente, la etapa de carga de la batería únicamente tiene sentido que funcione cuando hay alimentación externa que permita recargarla. Por tanto, en los momentos en los que no haya ninguna fuente externa en funcionamiento, esta etapa permanecerá apagada. Lo que se consigue de esta forma, es asegurar que dicha etapa funcione únicamente cuando debe, además de que no haya pérdidas parásitas de corriente que aumenten el consumo.

Una vez explicada esta parte, se va a desarrollar la siguiente fase del circuito de potencia: la elección del sistema de alimentación durante la noche.

Como ya se ha comentado, hay fases durante las 24h de un día en las que el sistema se va a poder alimentar desde el USB o desde la batería. Para que la batería se cargue adecuadamente y no se demande energía a través de la misma a la vez que se está cargando, se ha elaborado un circuito selector en el que, en caso de que ambas entradas de alimentación estén activas, el sistema por sí mismo priorice la entrada externa del USB y no se demande corriente a la batería.

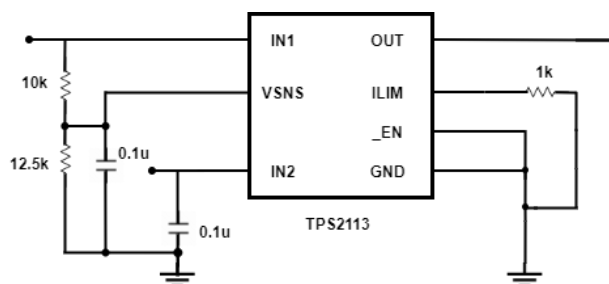


Figura 46. Conexiones del selector de alimentación

Se ha diseñado esta etapa en base al TPS2113 de Texas Instruments [33] (Figura 23). Se encarga de priorizar una de las dos entradas de tensión disponibles, siempre y cuando se cumpla una condición. Por defecto, da prioridad a la entrada de alimentación del pin *IN1*, aunque depende de la tensión existente en *VSNS*, que funciona como un interruptor que habilita la selección de las entradas. *VSNS* debe ser mayor de 0.8V para que poder seleccionar las entradas.

Debido a que *IN1* tiene prioridad sobre *IN2*, el USB va a quedar conectado a este pin. Si a ese punto se conecta el pin *VSNS*, cada vez que exista tensión en *IN1* se van a superar los 0.8V umbrales del pin *VSNS*. De esta forma, siempre que se conecte alguna fuente externa al USB de la PCB, el sistema se alimentará desde esta vía, sin demandar energía de la batería.

Para facilitar la comprensión, los modos de funcionamiento del componente se resumirán en la siguiente tabla:

Modos de funcionamiento	_EN	VSNS > 0.8 V	VIN2 > VIN1	Fuente de Alimentación en la salida
Modo 1	0	SI	X	IN1
Modo 2	0	NO	NO	IN1
Modo 3	0	NO	SI	IN2
Modo 4	1	X	X	Alta Impedancia

Tabla 10. Modos de funcionamiento del TPS2113

Hay que observar los modos 1 y 3 según la Tabla 10. El primero de los modos seleccionará el USB y el tercero se dará cuando no exista ninguna fuente externa conectada a dicho puerto. De esta forma *VIN1* será 0V, menor a la tensión de la batería, por lo que será esta última la fuente de alimentación seleccionada.

Por otro lado, el módulo permite elegir la corriente de salida máxima que puede ofrecer mediante una resistencia externa conectada directamente a masa. De forma similar a como lo hacía el regulador de carga, el selector calcula la corriente de salida máxima permitida a partir de la fórmula:

$$I_{out}(A) = \frac{500 (V)}{R (Ohm)}$$

En un principio se ha definido un valor de 1kOhm para esta resistencia, lo que daría pie a obtener una corriente de salida de hasta 500mA.

Una vez el sistema ha escogido automáticamente la fuente de alimentación apropiada, se debe convertir esta tensión a 3.3V estables.

Para ello se va a usar un convertidor Buck-boost con salida a 3.3V. Se trata concretamente el TPS63001, del que ya se ha hablado en el apartado 2.8.

Teniendo en cuenta el rango de tensiones en el que se encuentran las fuentes de alimentación del sistema (desde 2.7V mínimos de la batería hasta 5V de la entrada externa), no cabe otra posibilidad que usar un convertidor reductor-elevador. El TPS63001 está especializado en aplicaciones que se alimenten a partir de baterías de litio, es por ello por lo que se ha elegido este componente.

Funciona a partir de un control PWM que varía su ciclo de trabajo en función de las diferencias de tensión que se producen en su entrada y su salida. El componente monitorea dichas tensiones mediante la variación que se produce en un inductor y las compara con una referencia de tensión propia para corregir el error de la salida. Este método permite controlar el voltaje de salida a partir de la corriente. [33] [34]

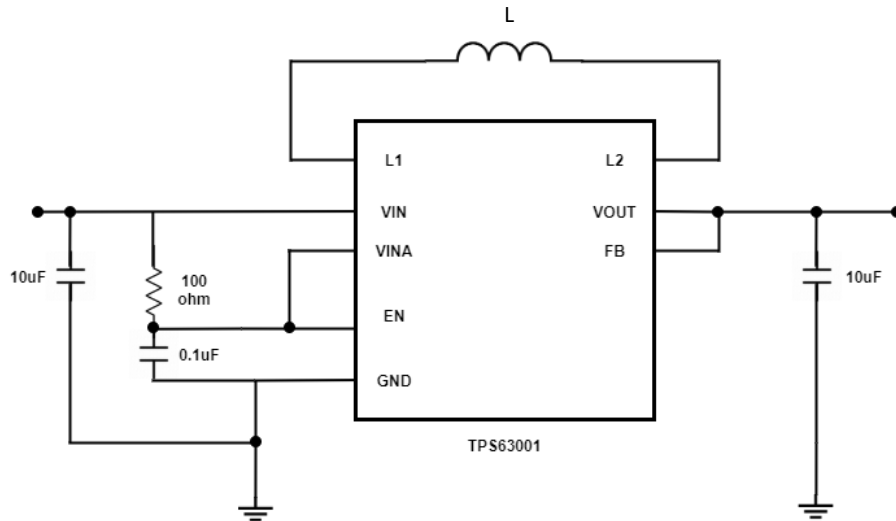


Figura 47. Conexiones del convertidor de tensión

Dentro de la circuitería que necesita este convertidor hay que resaltar los condensadores de entrada y salida, que permita disminuir las variaciones de tensión. En este caso, el fabricante recomienda usar valores superiores a 4.7uF en la entrada y de 15 uF para la salida, por lo que se han elegido valores de 10uF y 22uF, respectivamente.

Por otro lado, es necesario dimensionar el inductor que usa para sensar la corriente de salida. En este caso, se debe tener en cuenta el pico de corriente máximo que se va a producir, ya que de esta forma se elegirá un inductor con un valor de inductancia superior al mínimo necesario para evitar la saturación de la bobina.

El peor caso posible se produce en el modo *boost* del convertidor debido a que es la situación en la que mayor corriente debe atravesar la bobina. Si se supone que la potencia de salida del convertidor es prácticamente la misma que la entrada (no se puede despreciar la eficiencia del convertidor), se tiene que:

$$P_{IN} * \eta = P_{OUT};$$

$$V_{IN} * I_{IN} * \eta = V_{OUT} * I_{OUT}$$

$$2.7 V * I_{IN} * \eta = 3.3 V * I_{OUT}$$

$$I_{IN} = \frac{3.3 V * I_{OUT}}{2.7 V * \eta} = \frac{3.3 V * 113.36 mA}{2.7 V * 0.9} = 153.94 mA$$

Este valor de corriente de entrada es el máximo que se va a producir para el rango de tensiones de entrada predefinido.

Para calcular la inductancia necesaria, hay que recurrir a las fórmulas de dimensionamiento de un convertidor *Buck-Boost*. Lo primero que hay que calcular es el ciclo de trabajo para el peor caso posible, el que se acaba de comentar. En este caso, coincide con el cálculo del ciclo de trabajo para un convertidor elevador:

$$D = \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{V_{OUT}} = \frac{3.3V - 2.7V}{3.3V} = 0.182$$

Por otro lado, la corriente de pico máxima se puede definir como:

$$I_{max} = I_{L,medio} + \frac{\Delta I}{2},$$

donde ΔI es la variación de corriente. En un convertidor que funciona como elevador, la corriente de entrada media coincide con el valor de la corriente media por la bobina:

$$I_{L,medio} = I_{IN,medio} = \frac{I_{out}}{\eta * (1-D)} = 153.94 mA$$

Por otro lado, la variación de corriente en el inductor está directamente relacionada con la variación de tensión en el mismo:

$$\Delta V = L * \frac{dI}{dt} = L * \frac{\Delta I}{\Delta t} = L * \Delta I * f$$

Para fijar un valor mínimo de límite para la inductancia, se establece que la corriente mínima en la bobina debe ser positiva en todo momento. De esta forma se consigue mantener el convertidor funcionando en modo continuo, lo que simplifica los cálculos. De esta forma, se tiene que $\frac{\Delta I}{2} < I_{L,medio}$. Combinando las dos últimas expresiones obtienen las siguientes ecuaciones:

$$I_{L,max} = \frac{I_{out}}{\eta * (1 - D)} + \frac{V_{IN} * D}{2 * f * L}$$

$$I_{L,min} = \frac{I_{out}}{\eta * (1 - D)} - \frac{V_{IN} * D}{2 * f * L}$$

Donde f es la frecuencia de funcionamiento del convertidor, concretamente 2.5MHz según la hoja de características (típico). Puesto que $I_{L,min} > 0$:

$$0 < \frac{I_{out}}{\eta * (1 - D)} - \frac{V_{IN} * D}{2 * f * L}$$

$$\frac{I_{out}}{\eta * (1 - D)} > \frac{V_{IN} * D}{2 * f * L}$$

Para esta expresión se deduce L :

$$L > \frac{V_{IN} * D * \eta * (1 - D)}{2 * f * I_{out}} = \frac{V_{IN} * D * \eta * (1 - D)}{2 * f * I_{out}} = \frac{2.7V * 0.818 * 0.9 * 0.182}{2 * 2.5 * 10^6 \text{ Hz} * 0.11336 \text{ A}} =$$

0.64 μH

Este es el valor mínimo de inductancia que permite mantener el convertidor en modo continuo para la mayor corriente de entrada. Debido a ello, se ha decidido escoger un inductor de 2.2 uH de *Coilcraft*, concretamente el XAL5030-222MEC.

De esta forma, se ha completado el diseño de la etapa de potencia. En el siguiente punto se tratarán consideraciones que se han tenido en cuenta para garantizar mayor estabilidad en el funcionamiento y proteger los componentes del circuito.

.

3.4 Consideraciones del esquemático

Para evitar problemas eléctricos que puedan dañar o perjudicar a los diferentes componentes electrónicos, se han tenido en cuenta una serie de medidas.

A lo largo de la explicación del diseño se han ido dando pinceladas acerca de formas de proteger y regular ciertos componentes. Ejemplos de ello son el regulador de carga manipulable externamente, la red LC que limita el ruido eléctrico para la alimentación

analógica del microcontrolador, el diodo TVS de la salida de RF, etc. Ahora se van a tratar algunos más.

Para empezar, se ha utilizado un módulo puente de diodos conectado a un diodo TVS a la entrada del USB. De esta forma, se protege al resto del circuito de transitorios que puedan introducirse cuando se conecta y se desconecta dicho puerto. Los transitorios se producen debido a que las pistas pueden llegar a actuar como un inductor que provoca picos de tensión muy rápidos, y que pueden dañar severamente al circuito. El módulo en cuestión es el PRTR5V0U2X de Nexperia [35]. La poca capacitancia del diodo TVS permite responder muy rápido cuando se produce un pico de tensión.

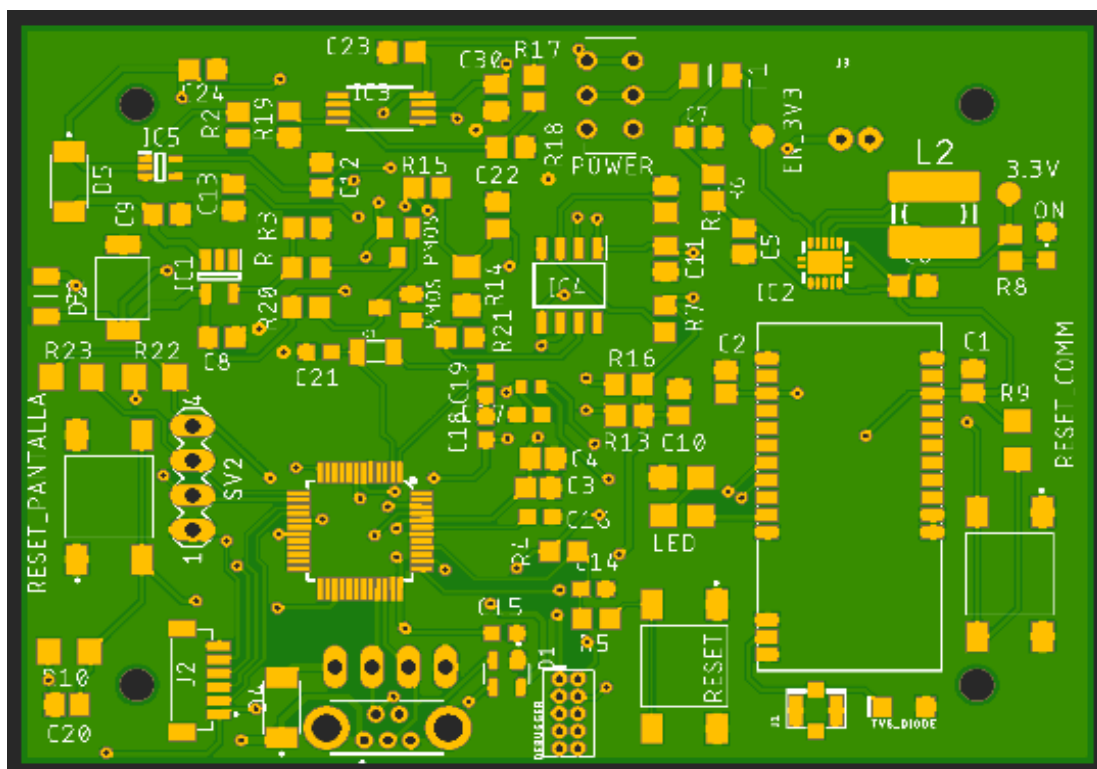
Siguiendo en esta línea, se han usado dos fusibles para proteger el resto del circuito en caso de que se produzca una elevación importante de la corriente. El primero, en la entrada de alimentación del USB. Este fusible no debe permitir corrientes mayores a 625 mA, ya que la corriente máxima de entrada del USB es de 500 mA. Para este tipo de dimensionamientos, se suele dar un margen de seguridad de un 25%. El segundo está situado justo antes de la entrada del convertidor de 3.3V. En cualquier caso, no se deben superar 625 mA como en el caso anterior. El fusible escogido es el ERBD0R63 de Panasonic [36]

Se ha incluido un diodo Schottky para prevenir el antirretorno en la salida del regulador de carga. De esta forma, se evita que la batería pueda descargar corriente sobre él y de paso se rebaja un poco la tensión de carga del regulador, de 4.2 nominales a 4.02V. (Ya que para 200mA de corriente directa, el Schottky permite una caída de voltaje de 0.18V)

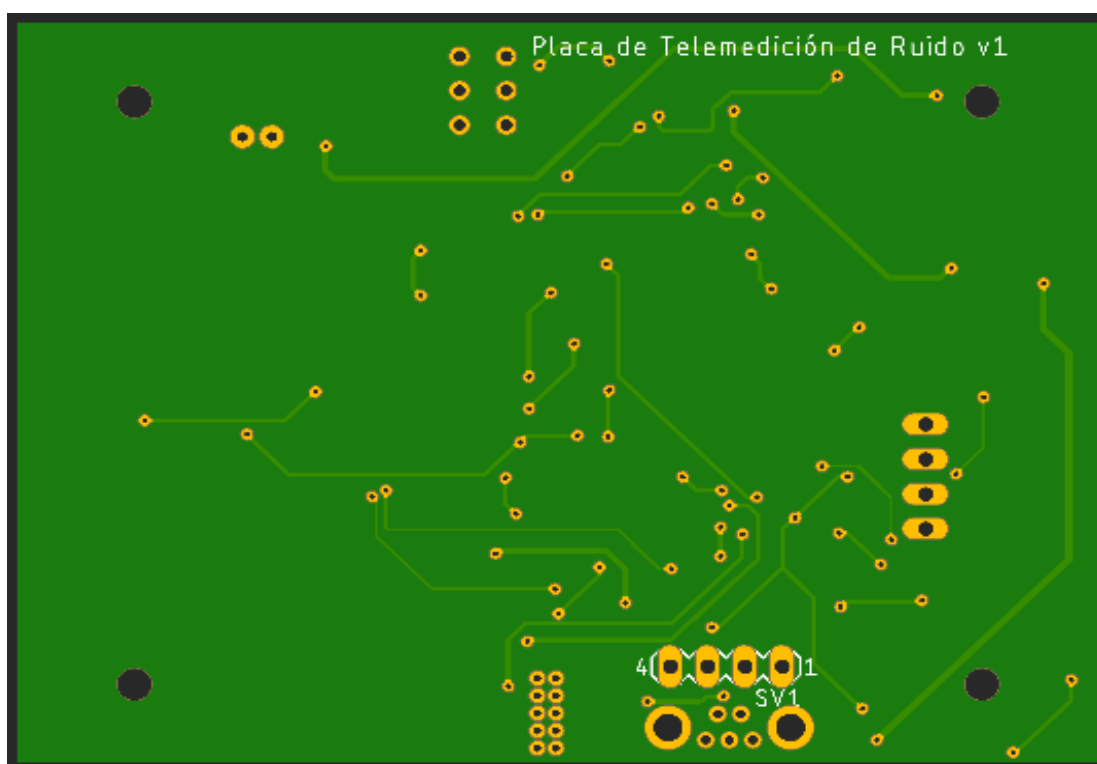
Por último, se ha incluido un conmutador (*slider*) de dos posiciones para actuar como switch externo. De esta forma, se da la opción al usuario de apagar el sistema externamente sin tener que desconectarlo, o bien, se puede cargar la batería sin que el sistema esté en funcionamiento.

3.5 Diseño final para fabricación

Todos los componentes mencionados hasta ahora van a formar parte de las PCB principal y del sensor, donde sus respectivas huellas darán forma al circuito. Los prototipos finales serán diseñados a doble cara. Las placas ya fabricadas quedarían de la siguiente forma. (Imágenes realizadas con *Eagle Manufacturing Tool*)

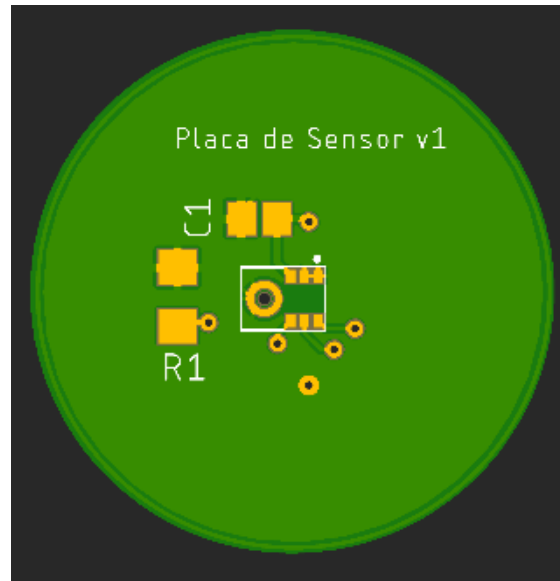


a)

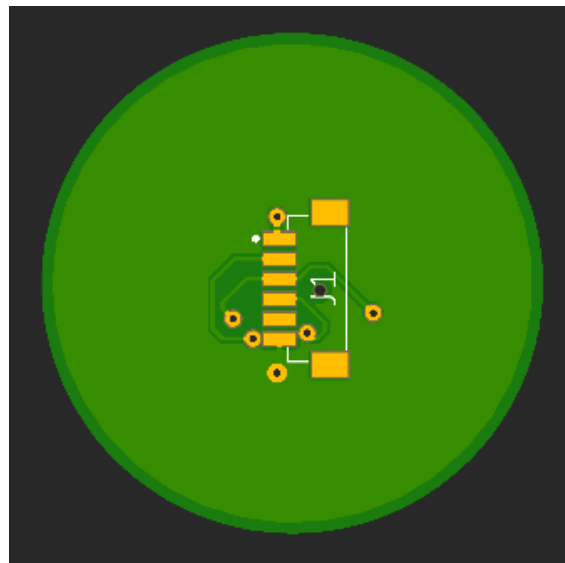


b)

Figura 48. Caras top (a) y bottom (b) de la PCB principal



a)



b)

Figura 49. Caras top (a)) y bottom (b)) de la PCB del sensor

4. FABRICACIÓN Y COSTES DEL DISPOSITIVO

Una vez se han tratado los aspectos de diseño hardware y software del dispositivo, se van a exponer las etapas de fabricación de este, pasando por el desarrollo de los planos necesarios y del modelo completo del dispositivo, para terminar con el presupuesto final para producción a pequeña escala (5 dispositivos por lote).

El motivo de profundizar en esta parte es dejar todo listo para que cualquier persona interesada sepa cómo proceder a la hora de fabricar el dispositivo. Para ello se van a desglosar los diferentes costes asociados al desarrollo, materiales, fabricación y montaje de los prototipos.

4.1 Lista de componentes

Conforme se ha ido avanzando en el diseño del sistema, se han ido seleccionando los diferentes componentes que formarán parte del mismo. En el siguiente listado se incluirán todos los mencionados componentes, además de otros que no se han tratado específicamente, como el depurador J-TAG que se va a emplear durante la programación de la PCB principal. Todos ellos son necesarios para el correcto funcionamiento del dispositivo. Dentro de este apartado, se ha tratado igualmente el coste económico de los componentes. Se ha elegido el distribuidor *Mouser* para realizar la lista de precios.

Nombre en la PCB	Componente	Referencia	Marca	Cantidad por placa	Cantidad a pedir	Precio
J1, J2	Conector JST	10147605-00006LF	Amphenol	2	10	5,56 €
R19	400 ohm	CR0603FX-4020ELF	Bourns	1	10	0,27 €
R18	12.5kohm	MCS04020D1252BE100	Vishay	1	10	1,76 €
R14	3.17 Mohm	CRCW12063M16FKEA	Vishay	1	10	0,72 €
R15	1Mohm	RN73R2ATD1004D25	KOA Speer	1	10	1,96 €
R6	100 ohm	RN73R2ATD1000D25	KOA Speer	1	10	1,96 €
R11	402kohm	MCT06030C4023FP5	Vishay	1	10	1,62 €
R7	100kohm	RN73R2ATD1003D25	KOA Speer	1	10	1,96 €
R20	1kohm	RN73R2ATD1001D25	KOA Speer	1	10	1,96 €
R5, R	360 ohm	CR0805JW-361ELF	Panasonic	2	10	0,18 €
R3	3.3kOhm	RCG08053K30JNEA	Bourns	1	10	0,90 €
R1, R8	180 ohm	CRCW0805180RFKEA	Vishay	2	10	0,56 €
R9, R10, R12, R13, R16, R17, R21, R22, R23,R24	10kohm	CRCW080510K0FKEAC	Vishay	8	50	2,65 €
C19, C21	15pF	C0603C150F5GACTU	KEMET	2	10	0,90 €
C16	1uF	CC0603KPX55BB105	Yageo	1	5	0,77 €
C6	22uF	JMK212BJ226KG-T	Taiyo Yuden	1	5	1,62 €
C9	4.7uF	JMK107BB7475KA-T	Taiyo Yuden	1	5	1,22 €
C2,C4,C5,C8,C10,C11,C12,C13,C14,C15,C18,C20,C22,C23,C24,C30,C31	0.1uF	0603B104K6R3CT	Walsin	16	50	3,80 €

C1,C3,C7,C17	10uF	JMK107ABJ106 KA-T	Taiyo Yuden	2	10	0,59 €
RESET, RESET_COM M, RESET_PANTALLA	PushButton	LL3301NF065QG	E-Switch	3	15	10,16 €
D2, D3	Diode TVS	SMBG6.0A	Vishay	2	10	4,90 €
U.FL	Conector Antena	A-1JB	Amphenol RF	1	5	3,74 €
	Debugger	8.08.91	Segger Microcontroller	1	3	90,55 €
U1	SAMD21	ATSAMD21G17D-AUT	Microchip	1	5	10,10 €
	Display	SH1106	SINO WEALTH	1	1	9,50 €
MK1	ICS-43432	ICS-43432	TDK	1	5	12,40 €
IC4	Comparador analógico	MAX9142ESA+	MAXIM INTEGRATED	1	5	11,95 €
IC1	Regulador de carga	MCP73831	MICROCHIP	1	5	2,52 €
D1	Puente TVS	PRTR5V0U2X	Nexperia	1	5	2,30 €
PMOS	PMOS	Si2371EDS	Vishay	1	5	1,89 €
NMOS	NMOS	2N7002	ON SEMICONDUCTORS	1	5	1,44 €
IC3	Interruptor Alimentación	TPS2113	Texas Instruments	1	5	10,50 €
IC2	Convertidor Buck-Boost	TPS63001	Texas Instruments	1	5	9,90 €
L2	Bobina	XAL5030-222MEC	Coilcraft	1	5	8,50€
F1,F2	ERB-RD0R63X	Fusible	Panasonic	2	10	2,08 €

POWER	EG1271A	Switch	E-Switch	1	5	3,24 €
BLUE	LED azul	SMLMN2WB1 CW1C	Dialight	1	10	2,78 €
GREEN	LED verde	597-3305-607F	Dialight	1	10	4,33 €
Y2	Cristal de cuarzo	ABS07-32.768KHZ-T	Abracon	1	5	3,20 €
	TD1208r	TD1208r	TD-Next	1	5	89,10 €
	Conector IP67 hembra	PX0412	Bulgin	1	2	15,68 €
F5	Ferrita	MMZ1005S601 HT000	TDK	1	5	0,66 €
J8	Puerto USB	651005136421	Wurth Electronic	1	5	13.50 €
	Conector IP67 macho	PX0410	Bulgin	1	2	13,38 €
TOTAL						369,18 €

Tabla 11. Lista de Componentes

El elemento más costoso es el J-TAG que, aunque no es un componente como tal de las PCBs, es necesario que el usuario disponga de él para las labores de depuración y programación del dispositivo. Sin él, el coste sería de 278.63€.

Aunque el código previamente expuesto irá precargado en el microcontrolador, el usuario final tiene libertad para que este pueda configurarlo a su gusto.

4.2 Modelo de fabricación del prototipo electrónico

4.2.1 Consideraciones en el diseño de la PCB

La restricción más importante que se ha tenido para la PCB principal ha sido el espacio disponible que ofrece la caja (dimensiones de 75mm x 55mm máximo para la PCB

principal). Debido a ello se han integrado los componentes de forma exhaustiva, siempre cumpliendo con las restricciones del fabricante (*Design Rules Check*).

Teniendo en cuenta que los componentes se van a soldar usando el horno, estos tienen que estar sobre una única cara, aunque las pistas sí fluyen por ambas caras. Esto fue una restricción importante ya que, si se pudiese haber usado ambas caras, podría haber existido mayor separación entre componentes y que fuese más sencillo acceder a cada uno de ellos dentro de la PCB.

Concretamente, la cara *bottom* se ha destinado principalmente para las pistas de alimentación y de señal que no requieran de gran importancia. Sin embargo, las pistas de señal que son críticas y necesiten de gran velocidad de propagación, véase las de datos USB, se han dispuesto por la cara *top*.

Por otro lado, se ha intentado en la medida de lo posible que los componentes integrados más importantes, como el microcontrolador, estuviesen un poco aislados del resto de componentes, ya que de esta forma se garantiza mejor soldadura y que ningún componente pueda afectar a su funcionamiento.

También ha sido importante escorar hacia uno de los lados de la PCB el conector de la antena. De esta forma, la antena quedaría más cerca de dicho conector, mejorando la transferencia de los datos.

Se ha elaborado un plano de masa en ambas caras. De esta forma, usando vías, se pueden conectar las diferentes zonas de masa para que no se generen islotes aislados.

Se ha procurado que los componentes SMD estén todos en métricas entre 0603 y 0805, de forma que esté todo con un tamaño parecido y estandarizado, con la ventaja de ser más fáciles de colocar y soldar que los 0402.

Los esquemáticos y las capas de las placas principal y del sensor son mostradas en los **Anexos B y C**.

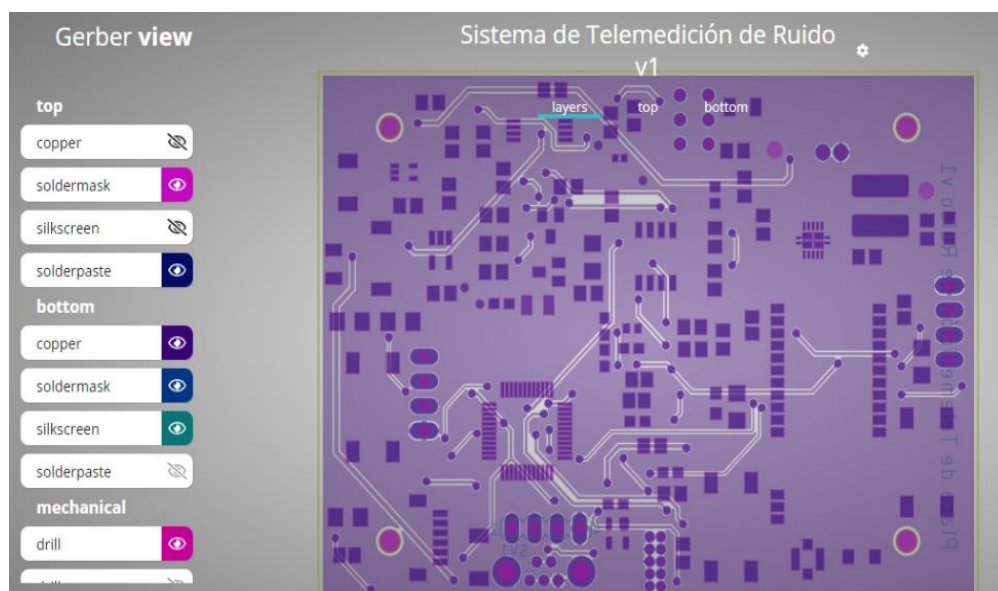
4.2.2 Archivos generados

Una vez se ha acabado con el diseño de las PCB, se tuvieron que generar los archivos *Gerber*. Cada archivo se corresponde con una capa de la PCB. Estos archivos son requeridos por el fabricante para realizar la placa.

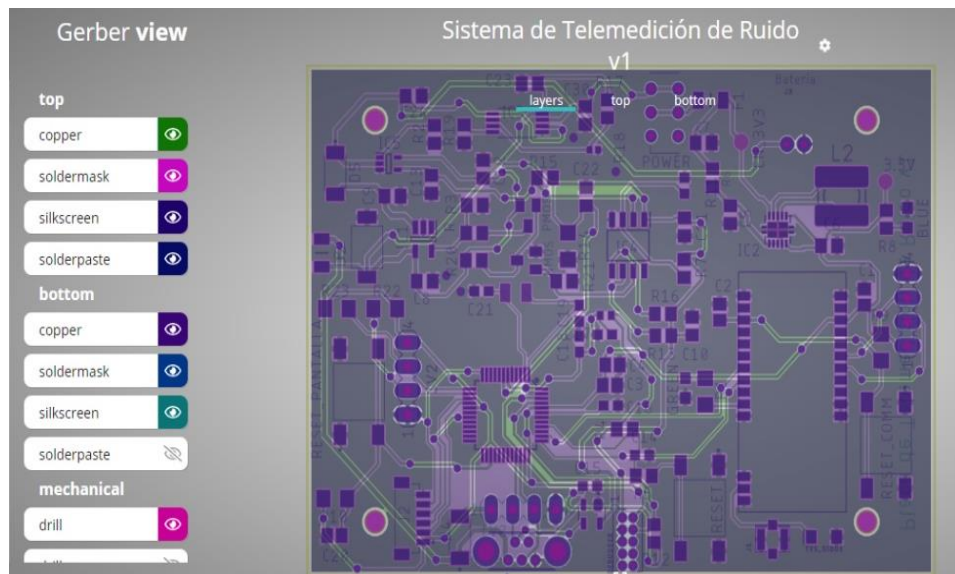
Carpeta de archivos						
	solderpaste_top....	12.544	2.824	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	47DA11FC
	solderpaste_bott...	148	133	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	DC490B1C
	soldermask_top....	11.157	2.802	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	F1FCF1E5
	soldermask_bott...	2.811	869	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	FC147AA7
	silkscreen_top.gbr	383.473	115.780	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	9E255180
	silkscreen_botto...	50.291	14.743	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	17EB14A6
	profile.gbr	6.051	1.440	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	933E473B
	gerber_job.gbrjob	597	314	Archivo GBRJOB	22/03/2020 18:51	7F62C909
	copper_top.gbr	572.451	175.763	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	8535060B
	copper_bottom....	153.670	47.896	Archivo GBR	22/03/2020 18:51	B729D67A

Figura 50. Archivos generados para la fabricación de la PCB

Tal como se puede ver en la Figura 50, para cada PCB es necesario que el fabricante conozca la capa de aislante de estaño (*soldermask*) de las capas que tenga la PCB (2 en este caso, aunque podrían ser muchas más), la capa de soldadura (*copper*), las capas de serigrafía (*silkscreen*) y el borde que define la placa (*profile*). Además de ello, si se desea una herramienta (Stencil) para aplicar pasta de soldadura a los pads, se requiere de la capa *solderpaste*.



a)



b)

Figura 51. Visualización de las capas de las PCBs por parte de los fabricantes a partir de los archivos Gerber. Imagen a) capas sin cobre ni serigrafías. Imagen b) todas las capas en visualización (Fuente: <https://www.pcbway.com/project/OnlineGerberViewer.html>)

Una vez generados estos archivos, hubo que seleccionar al fabricante adecuado para que se encargue de fabricar las PCB.

4.3 Presupuesto de fabricación de PCBs

La Escuela dispone de equipo para fabricar placas de circuito impreso. Sin embargo, la PCB principal del sistema es difícil de realizar en el equipo que se dispone en los laboratorios, ya que este está dedicado a las labores de investigación del departamento.

Puesto que se quiere fabricar un lote de 5 PCBs para empezar, la opción de fabricarlas en la Escuela no es viable. Además de ello, la calidad con la que un fabricante especializado a nivel industrial es capaz de producir estas piezas es superior a la que se puede alcanzar de forma manual en el laboratorio. Por este motivo, se ha realizado una búsqueda de fabricantes de PCBs para obtener los presupuestos que estos remiten una vez se definen las características de las placas que se desea fabricar. Los candidatos fueron 2CISA, EURO CIRCUITS, JLC-PCB y PCBWAY.

Dentro de las diferentes opciones que ofrecen los fabricantes en su web para caracterizar la PCB se suelen encontrar las dimensiones de la placa (largo x ancho (mm)) y el número de capas de la placa. Entrando de forma más específica en la tecnología de la PCB, normalmente se suele usar una resina como base que actúa de dieléctrico. La más común es la FR-4, un tipo de resina epoxi-cristal [37]. Además de ello, se suele establecer el grosor de la PCB, donde el espesor del cobre se suele dejar de forma estándar en $35\mu\text{m}$.

Por otro lado, se tienen que detallar las dimensiones mínimas de los anchos de pista, la distancia entre pistas, y otros elementos como dimensiones de las vías y de los agujeros. El valor mínimo que impone el fabricante debe ser menor que el mínimo de la PCB en cuestión para que pueda ser fabricada.

Para finalizar, hay que especificar el acabado superficial de las placas. Es preferible que cumpla con la verificación RoHS (*Restriction of Harmful Substances*) para que no contenga plomo o sustancias peligrosas y contaminantes. En caso de fabricarse siguiendo esta pauta, se incluiría un logo en la PCB. El logo RoHS indica el cumplimiento de la Directiva 2002/95/CE y 2011/65/CE de Restricción de Sustancias Peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos [38].

El conjunto de todas estas restricciones se denomina DRC

En todos los casos se estableció el coste de envío más asequible. La desventaja que esto conlleva es un aumento en el tiempo de espera de recepción del producto. Puede variar entre las diferentes empresas distribuidoras, pero equivale a unas 2-3 semanas de tiempo de envío.

Todos estos requisitos se resumen dentro de las opciones del fabricante en los siguientes apartados:

- Dimensiones y Cantidad
- Materiales
- Dificultad o Restricciones
- Acabados
- Stencil
- Envío

Nota: Se va a redactar la forma de realizar presupuestos usando como referencia la PCB principal del sistema. Debido a que el proceso de diseño fue equivalente para la PCB del sensor, no se considera necesario repetir todo.

4.3.1 Fabricantes

1. 2CISA (<https://www.2cisa.com/cotizacion/>)

Dentro de su página de configuración de pedidos de PCB se puede definir el tamaño de la placa y el número de caras. En este caso se han definido las características ya mencionadas.

En cuanto a las opciones de *Materiales*, se ofrecen 4 tipos de material base: FR-4 CTI600, FR-4 HL Free, FR-4 High TG y FR4 común. La denominación CTI600 hace referencia a la resistencia superficial del material a las descargas eléctricas. El valor de FR4 de 2CISA es de entre $175V < CTI < 250V$. En ese caso el CTI600 soporta hasta 600V. Por otro lado, el dato High TG implica que la temperatura a la que la resina empieza a perder propiedades cristalinas para ser más ‘suave’ es más elevada que en un FR-4 normal (formalmente se conoce como transición vítrea).

HL Free hace referencia a que la PCB se fabrica libre de halógenos, es decir, libre de contaminantes. Debido a las características del sistema se eligió el material FR-4 HL Free. El grosor mínimo disponible es de 0.35mm, aunque el valor estándar suele ser de 1.6mm, que fue el que se escogió. El cobre sí se elige de $35\mu m$.

Dentro de *Dificultad* se ofrecen las dimensiones mínimas de las pistas y los taladros, de $200\mu m$ y 0.25mm respectivamente para cobre de $35\mu m$ de espesor. Por otro lado, la distancia mínima entre pads es de 0.1 mm. Usando estos datos como DRC, se observó que no se cumplía con estas especificaciones. En caso de elegir a 2CISA como fabricante, habría que variar el diseño de la placa.

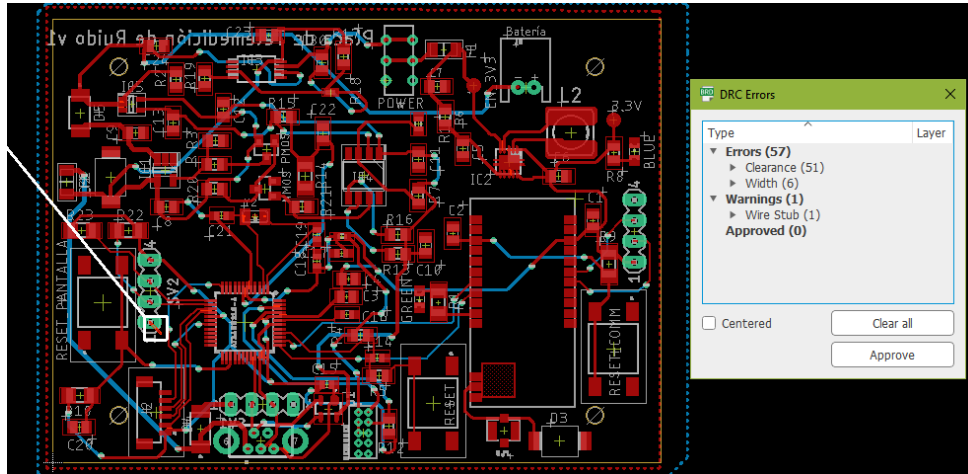


Figura 52. DRC de 2CISA

En el apartado de *Acabados* se estableció que se realizase la PCB cumpliendo con la marca RoHS y que se procediera con el test eléctrico para comprobar posibles fallos.

Para finalizar, se definieron las características de la Stencil, la cuál es de 350x260mm por defecto. Al incluir todos estos datos se procedió a ver el precio que costaría fabricar 5 placas con estas características.

Actualización a día 10/4/2020

El fabricante 2CISA no remite un presupuesto para las especificaciones establecidas por lo que no se puede hablar del precio total.

2. EURO CIRCUITS (<https://be.eurocircuits.com/shop/orders/configurator.aspx>)

En primer lugar, se indica poner las dimensiones de la PCB, la cantidad que se quiere pedir y el tiempo de envío. En este caso, el tiempo de envío por defecto es de 3 días y se ha aumentado a 10 días para disminuir el coste. A partir de los diez días no se aprecia reducción del precio.

En el apartado de *Materiales*, se da la opción de elegir el espesor de la PCB en un amplio rango de valores. Se escogió 1.55mm ya que es el más cercano a 1.6mm. No se especifica

el material, presumiblemente es FR-4, aunque sí se da a elegir el punto de temperatura TG, entre 145° y 170°. Se eligió el primero.

En cuanto a *Restricciones*, los valores mínimos permitidos para el espesor de cobre de la PCB son: 0.125mm para el ancho de las pistas y 0.125mm para la distancia entre elementos en la PCB.

Dentro de este apartado también se ofrece la posibilidad de definir la cantidad de agujeros en la placa como n° agujeros/dm². Se dejó este valor por defecto, es decir, en <1000/dm². El diámetro mínimo de agujero en la PCB es de 0.5mm por lo que está por debajo del mínimo que ofrece el fabricante, 0.1mm. Pasando este DRC a la placa no se obtuvo ningún error, por lo que la PCB es fabricable.

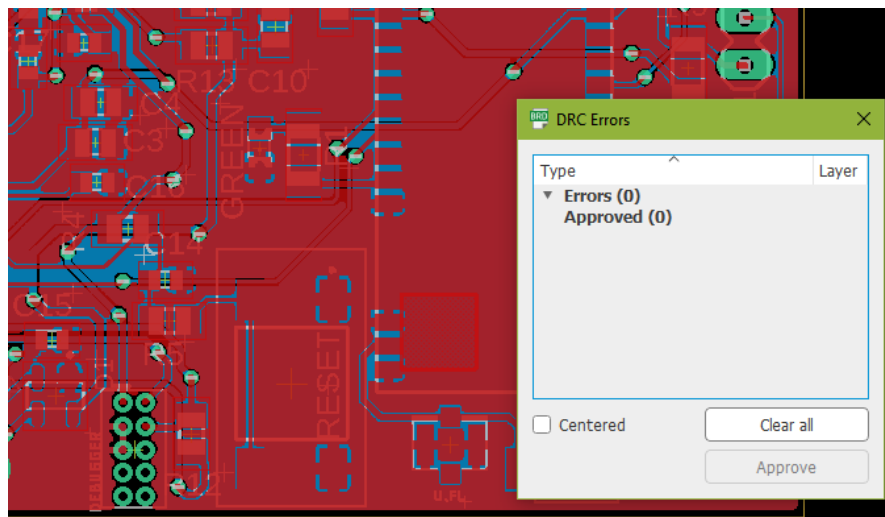


Figura 53. DRC de Eurocircuits

En cuanto a los acabados se ofrecía la posibilidad de escoger cualquiera que no incorpore plomo de forma, además de poder elegir los colores del soldermask y la serigrafía.

Para acabar, la Stencil se seleccionó únicamente para la cara *Top* en este caso, y con el tamaño por defecto (115mm x 95mm). El precio final sería de 143.45€.

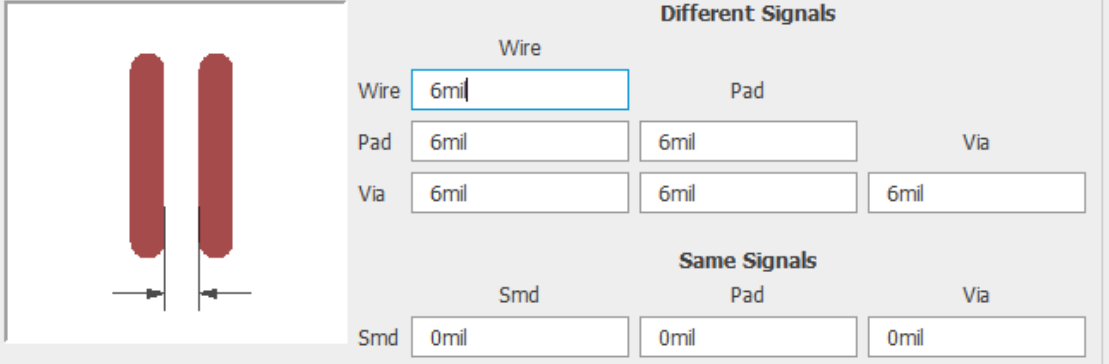
3. JLCPCB (<https://jlcpcb.com/>)

En este caso, el fabricante da la opción de adjuntar directamente el archivo Gerber para poder calcular directamente las especificaciones del apartado de *Dimensiones*.

Dentro de los materiales, únicamente se da la opción de FR-4 Standard TG 130-140°.

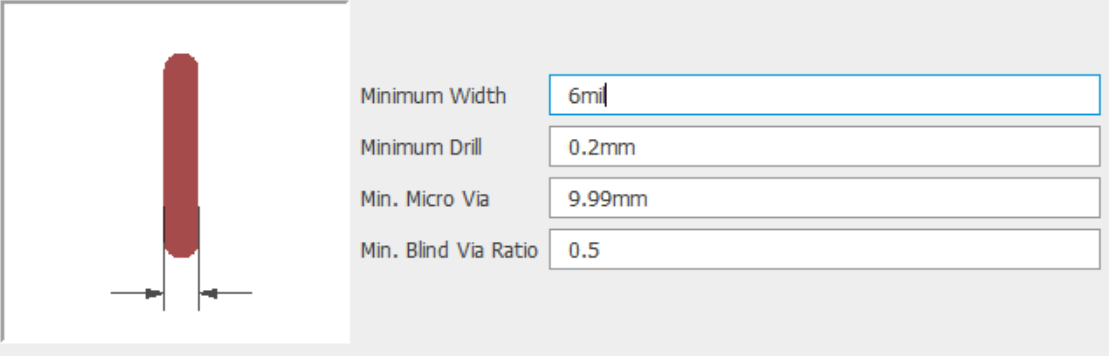
A continuación, se presentan los acabados. Estos pueden ser HASL (con o sin plomo) y ENIG-RoHS. Este último es más caro ya que incorpora una fina capa de oro con revestimiento electrolítico con el que se mejora la adherencia de los componentes al soldarlos. Esto es debido a que el recubrimiento reduce las imperfecciones superficiales. Se eligió esta última opción a pesar de aumentar el coste en unos 10€. También se ofrece la posibilidad de hacer electropulido para mejorar la colocación de los componentes más pequeños o que dispongan de menor espaciado.

Por último, se escogió el tamaño por defecto (380x280 mm) de la *Stencil* para la cara *Top*. Las restricciones del fabricante se encuentran dentro de otro apartado de la web (<https://jlcpcb.com/capabilities/Capabilities>). En ella se detallan las siguientes restricciones de dimensionamiento:



Different Signals			
Wire	6mil		
Pad	6mil	6mil	Via
Via	6mil	6mil	6mil
Same Signals			
Smd	0mil		
Pad	0mil	0mil	Via
Via	0mil	0mil	0mil

a)



Minimum Width	6mil
Minimum Drill	0.2mm
Min. Micro Via	9.99mm
Min. Blind Via Ratio	0.5

b)

Figura 54. DRC del fabricante JLCPCB

Pasando estas reglas de diseño a la placa no se obtuvo ningún error. El precio que ofrece el fabricante para un lote de 5 PCBs en un período de envío de 15-25 días es de 42.49€.

3. PCBWay (<https://www.pcbway.com/QuickOrderOnline.aspx>)

El último fabricante del que se ha obtenido presupuesto ha sido PCBWay. En su web se habilita, igual que en la de JLCPCB, la opción de añadir directamente el Gerber de la PCB para comprobar los parámetros relacionados con la dimensión. En cuanto a los materiales empleados se da la opción de elegir entre FR-4 y aluminio, siendo la primera la preferida.

A diferencia del anterior fabricante, se ofrece la posibilidad de escoger entre TG 130-140° y TG 150-160°. En principio, la opción de 130° es más que suficiente.

En las *Restricciones*, el espaciado mínimo es de 4 milésimas de pulgada. Como se puede apreciar, las dimensiones mínimas aceptables son incluso menores que en JLCPCB, con lo que se garantiza que la placa pasará el DRC de este fabricante, ya que lo hizo con el primero.

Dentro del apartado de *Acabados* se puede escoger entre HASL con o sin plomo, ENIG e incluso ninguno, dejando el cobre liso. Igual que antes, se prefirió el acabado ENIG.

La Stencil tendría unas dimensiones de 370mm x 470mm y se incluiría la cara top de la PCB.

Por último, se propuso un envío estándar a España de unos 15-16 días. El total sería de 79\$ (no se especifica el cambio de divisa a €).

Tal y como se especificó al inicio de este punto, se ha usado como ejemplo la PCB principal para explicar las reglas que imponen los fabricantes a la hora de elaborar el presupuesto. Al igual se ha de hacer con la placa del sensor. De esta forma, en la Tabla 12 se resume el coste total por cada uno de los fabricantes y los tiempos de envío.

Fabricante	Coste PCB principal	Coste PCB Sensor	Coste Total (incluye Stencil)	Tiempo de envío
2CISA	-	-	-	-
Eurocircuits	143.45 € (panel de ambas PCBs)	-	202.59 €	10 días
JLCPCB	18.60 €	6.79 €	49.54 €	15-25 días
PCBWay	79 \$ (panel de ambas PCBs)	-	139 \$	25-40 días según <i>China Post</i>

Tabla 12. Comparativa de precios entre fabricantes

Como se puede comprobar, el fabricante con mejor relación tiempo de envío/precio es JLCPCB, y por tanto es el escogido para llevar a cabo la labor de producción de las PCBs.

4.4 Etapa de montaje de las PCBs

Lo ideal para realizar el montaje de los componentes sobre las PCB sería usar un sistema Pick & Place automatizado [39]. De esta forma se ahorra mucho tiempo ya que sería cuestión de programar donde irían los componentes y colocarlos adecuadamente dentro de la máquina para que esta hiciese el trabajo.

Sin embargo, hay dos factores a tener en cuenta. El primero es que la máquina disponible en la Escuela es para usos dedicados a la investigación. El segundo es que la producción se va a realizar en pequeños lotes de 5 PCBs (realmente serían 5 PCBs principales y 5 del sensor). Al no ser un flujo de trabajo tan grande y exigente como el de una industria, se ha optado porque la colocación de los componentes se realizará a mano, para después soldarlos usando el horno.

El tiempo dedicado para montar los componentes y soldarlos es aproximadamente de 1h por cada PCB, lo que implica una tasa de producción de 5 PCBs/día suponiendo una jornada de 5h (De 9:00 a 14:00, por ejemplo).

Puesto que se desea fabricar más de una tanda de dispositivos, la tarea de montaje de las PCBs debería ser realizada por un técnico dedicado a ello. (En caso de que se hubiese deseado hacer unas muestras y nada más no se tendría la necesidad de plantear este caso).

Viendo el promedio salarial en diferentes webs dedicadas a la búsqueda de empleo y en la página del Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social, el salario anual de un técnico de laboratorio es de 13.500€-18.500€. En algunas empresas se establece el salario en €/hora, estando este valor en un rango de entre 9-15€/hora [40][41], siendo la media de 11.29 €/hora [42]. Por tanto, se puede estimar el coste de contratación de un técnico para el proyecto en 56.45 €/lote de dispositivos.

En caso de seguir mejorando el prototipo y que se decida que se ha alcanzado una versión definitiva que pueda ser comercial, habría que estudiar la posibilidad de aumentar la producción, y por tanto se requeriría de un sistema Pick & Place. En dicho caso, se necesitará la contratación de una empresa dedicada al montaje de PCBs para fabricación en serie.

4.5 Modelos físicos de los componentes del sistema.

4.5.1 Conectores externos

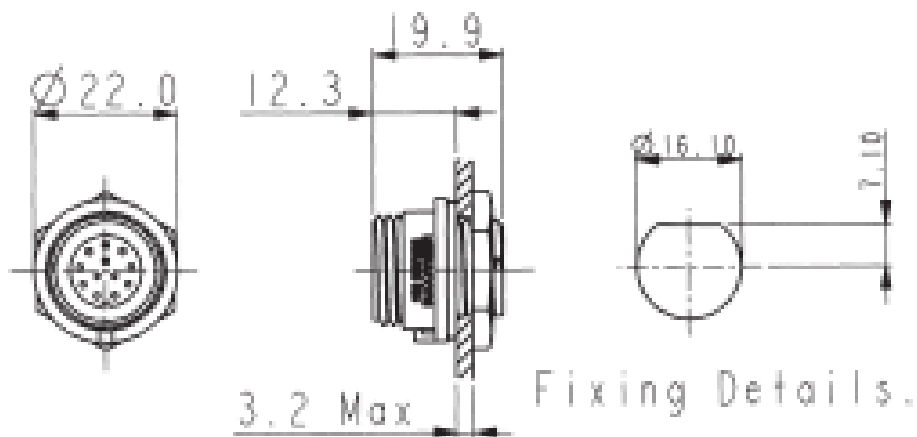
Uno de los requisitos fundamentales del dispositivo es la capacidad de mantener su integridad ante las inclemencias climáticas. Debido a que el sistema precisa de varias conexiones externas como son el puerto USB, las conexiones propias del sensor, y la antena, es necesaria la inclusión de conectores especiales (con protecciones IP67 como mínimo) que sirvan de interfaz entre el interior y el exterior de la caja. Dentro del catálogo de productos de diversos fabricantes, se ha decidido confiar en la empresa Bulgin [43], especializada en conectores ruggedizados e industriales.

Dentro de su gama de producto se encuentra la gama *400 Buccaneer*. Son los segundos más pequeños en cuanto a dimensiones pero que tienen gran capacidad de aislamiento. Cuentan con protección IP68 ante polvo y agua.

En primer lugar, se precisa de un conector de 6 pines para que se pueda comunicar el sensor con la PCB principal. Como ya se mencionó en el punto 3.2.1, estas conexiones se corresponden a alimentación (VCC) y masa (GND), además de las señales necesarias para la comunicación. Partiendo de estos requisitos, se ha incluido en la cara interna de la caja el modelo PX0412 hembra de 6 pines.



a)



b)

Figura 55. Imagen (a)) y planos (b)) del PX0412 (Fuente: hoja de datos oficial)

Nota: En los planos que se muestran de los conectores de Bulgin puede no aparecer el modelo con el mismo número de pines que el elegido para la aplicación. El fabricante ofrece variantes de hasta 12 pines para cada modelo. Sin embargo, las dimensiones son

exactamente las mismas. Debido a ello el fabricante ofrece un único plano de dimensiones por modelo de conector.

Dentro de las otras posibilidades existentes (como puede ser el modelo PX0413 del mismo fabricante) la elegida se diferencia en tener menor tamaño. Esto es una ventaja, ya que ocupa menos espacio en la caja.

Este conector se acopla por fuera de la caja hacia el PX0410 de 6 pines macho. La conexión se realiza de forma directa mediante los pines de conexión para después encajarse completamente mediante un anillo con rosca que garantiza seguridad en el agarre y estanqueidad.



Figura 56. Planos e imagen del PX0410 (Fuente: hoja de datos oficial)

El conector PX04010/6P es el más complejo de los que se van a utilizar y es por ello por lo que se le va a dedicar más atención. Este elemento se compone por cinco piezas. Estas son, del 1 al 5: la tuerca de ajuste, la pieza de unión, el perno, el cuerpo del conector, y la cabeza del conector. Esta última pieza es la que alberga los pines de conexión y la que se conecta al PX0412. Incorpora un anillo que bloquea el movimiento cuando se enrosca sobre el PX0412.



a)



b)



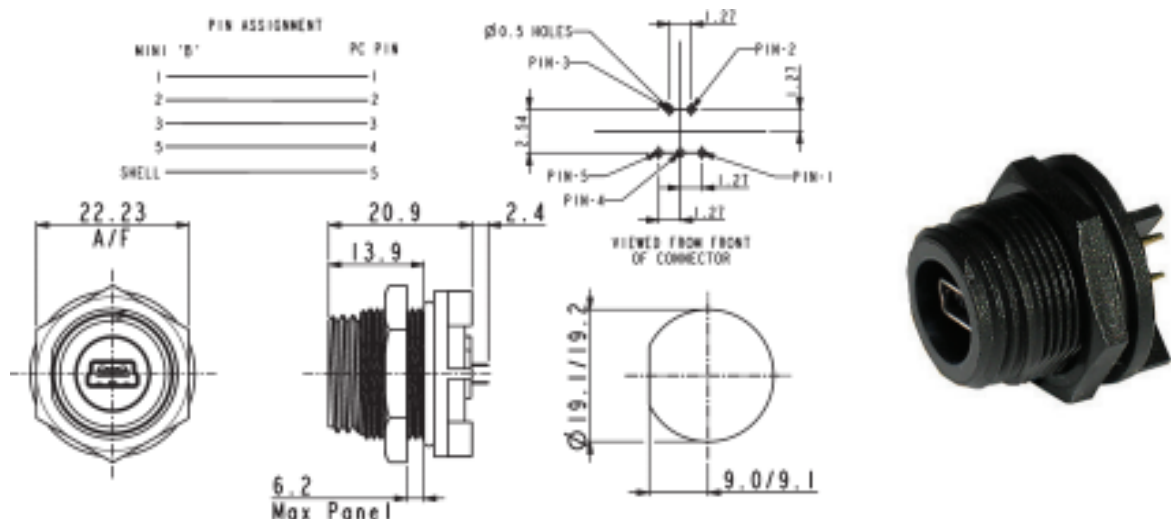
c)

Figura 57. Ensamblaje de los conectores PX0410/12

En la Figura 57 se pueden ver la forma en la que se ensamblan. En la imagen b) se han conectado los pines, y la posición final (imagen c)) se corresponde al bloqueo mediante roscado del anillo que está en la cabeza PX0410.

En el otro extremo del conector se debe incorporar la probeta del sensor. Esta probeta se introduce, a través de la tuerca, pasando por la unión y el perno. A continuación, se incorpora el cuerpo del conector y se rosca a la tuerca para que no se salga. En este punto, los cables de conexión del sensor (que van por el interior de la probeta), se pueden conectar a la cabeza del conector. De esta forma, las conexiones pueden fluir hasta el interior de la caja cuando la cabeza del PX0410 y el conector PX0412 se ensamblen.

En la cara interna de la caja se usará el modelo PX0447, hembra de 5 pines. Esta elección se debe a que es el modelo de conectores USB que permite la conexión pin a pin por separado, por lo que se podrá saber a ciencia cierta qué pin del puerto USB de la PCB se debe conectar a cada pin del PX0447.



En el lado externo se incorporará el PX0441, macho, que incluye una salida a USB tipo A para conectarlo fácilmente a un cargador. El cable que incorpora es de 2m por defecto, con opciones de 3 y 4m. La opción de 2m es la más recomendable ya que no se precisa de tanta longitud de cable y es más económica.

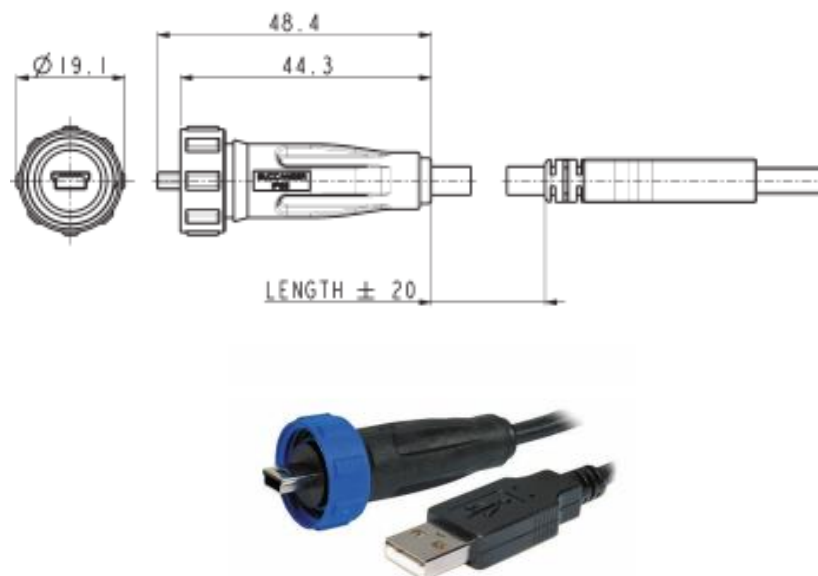


Figura 59. Planos e imagen del PX0441 (Fuente: hoja de datos oficial)

Por último, hay que hablar acerca de la salida de radiofrecuencia del módulo SigFox hacia la antena. La antena es un elemento externo a la caja, por lo que debe estar protegida de forma específica.

Para ello, en el catálogo de Bulgin hay una serie de antenas con conector IP67. Dentro de los datos más importantes cabe destacar que la impedancia del conector coaxial que dispone es de 50 ohm, al igual que la que posee el conector para cable coaxial de la PCB. Este hecho es importante para que la transferencia de energía de la señal sea máxima y no haya atenuación de la misma.

En este caso, Bulgin diferencia sus antenas por su posición y su rango de frecuencias

Modelo	Angulo relativo a su conector	Frecuencia
PX0407	0/90°	2.4-2.5 GHz
PX0408	0/90°	440-470 MHz
PX0409	0/90°	850-900 MHz

Tabla 13. Antenas de Bulgin

Hay que recordar que la frecuencia de funcionamiento de SigFox es de 868 MHz en Europa y, por tanto, en España. Por otro lado, ya que el conector coaxial se encuentra en un lado de la PCB, es preferible la configuración de 90° para que la antena termine mirando hacia arriba.

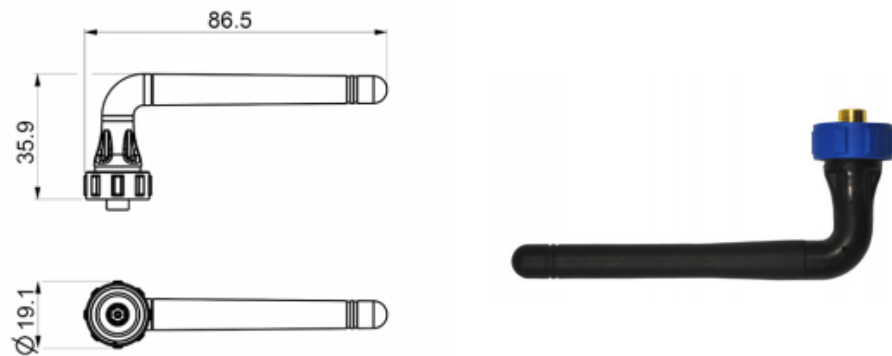


Figura 60. Planos e imagen del PX0409 (Fuente: hoja de datos oficial)

Esta antena a su vez se debe ensamblar con el PX0414, el cuál incorpora un cable coaxial para conectarlo directamente con el conector de la PCB. En este caso no hay opción posible, el PX0414 es específico para la antena PX0409.

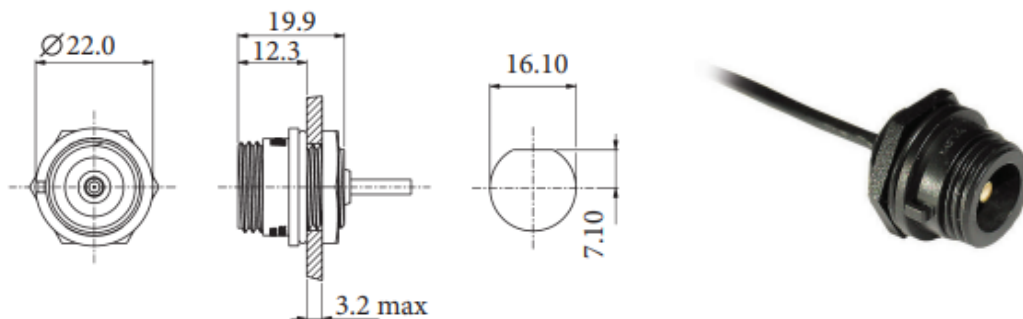


Figura 61. Planos e imagen del PX0414 (Fuente: hoja de datos oficial)

4.5.2 FUSION 360

Para confirmar que el dimensionamiento físico de los elementos de la PCB es correcto, al igual que para visualizar el sistema completo, (PCB principal, sensor, pantalla, batería, antena y soporte físico del mismo) se ha realizado un modelado en 3D de todas estas partes. Para ello, se ha usado el software de CAD 3D *Fusion360* (<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>). Todos los modelos 3D que

se muestran en siguientes figuras proceden de este programa, una vez importados y analizados, o creados nuevos.

Las razones principales para usarlo son dos principalmente. La primera es que, al ser también un programa de Autodesk, se sincroniza de forma magnífica con *Eagle*. Gracias a ello se puede acceder a una nube propia (asociada a la cuenta del usuario) de Autodesk donde se sincronizan los modelos de componentes y PCBs que se hayan diseñado. Además de ello, ofrece una licencia de estudiante con todas las opciones disponibles para poder sacar el máximo partido al programa sin tener que recurrir a ‘otras vías’ (no legales).

Dentro de las funcionalidades del programa se encuentran las típicas de los software CAD especializados en diseño mecánico, como pueden ser CATIA V5 o SolidWorks. Contiene las herramientas clásicas para crear, modificar o ensamblar cuerpos bidimensionales y tridimensionales, así como para diseño sobre chapas o creación de mallas para análisis de elementos finitos y cálculos de resistencia y estrés mecánico. Dispone también de la clásica estructura de árbol, en la que los distintos elementos incluidos en el diseño tienen una jerarquía y se ordenan. Aunque puede resultar confuso, el saber usarlo agiliza mucho el trabajo. Eso sí, no llega a ser tan complejo como el de los otros software anteriormente mencionados.

Por otro lado, permite agregar materiales y apariencias a los cuerpos, de forma que estos tengan diferentes propiedades físicas en función del material que se les indique.

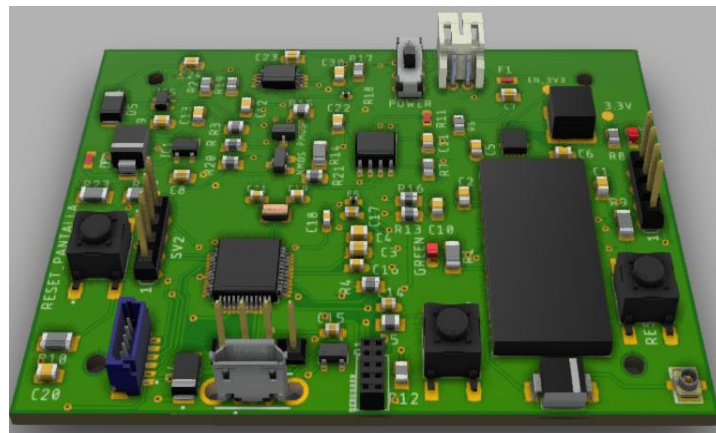
Una característica interesante, es el apartado *Animation*. En él se pueden crear vídeos de explosión para poder visualizar como los componentes interactúan entre sí. Esta herramienta es especialmente útil para general planos de explosión de diversos conjuntos.

En definitiva, se trata de una herramienta completa que ofrece la posibilidad de trabajar desde la nube asociada a tu cuenta de Autodesk (lo que permite el trabajo entre dispositivos), y cuenta con las funcionalidades necesarias para poder diseñar perfectamente.

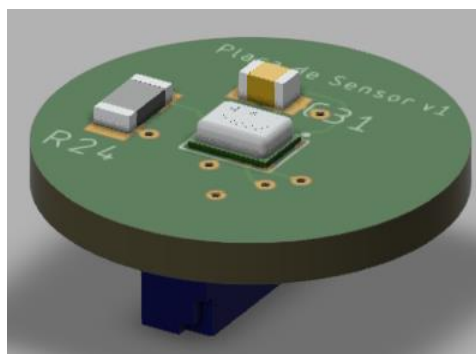
4.5.3 PCBs

Usando la herramienta *library.io* (extensión de Eagle) se han podido crear los diferentes modelos 3D de los componentes para después transferirlos directamente a Fusion360.

Gracias al ecosistema que forman las aplicaciones de Autodesk ha sido posible además transferir la PCB diseñada en Eagle. Aplicando estos recursos se puede ver el resultado final en la Figura 62.



a)



b)

Figura 62. Diseño 3D de las PCBs que componen el sistema. Realizado en Fusion360

4.5.4 Soporte físico

Tal y como se comentó en el punto 2.8, el sistema va a estar insertado en una caja con protecciones IP67. Dentro del mismo fabricante existen más opciones interesantes, como por ejemplo la TG ABS 88-6. La principal diferencia que tiene este modelo es que la altura de la caja es de 55mm, en vez de 85mm.

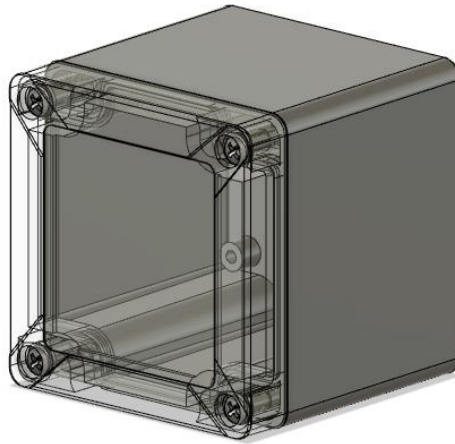


Figura 63. Modelo 3D de la caja IP67 en Fusion360

La razón principal de escoger un espacio más alto para la caja, siendo el diseño electrónico de inferiores dimensiones, es debido a que los conectores externos ocupan un espacio importante en la misma. Según los planos (Figura 28), el espacio disponible para la PCB y los componentes (eliminando el espacio ocupado por los alojamientos de tornillos) es de 69.7 mm. Sin embargo, en los huecos restantes donde no hay alojamientos se van a colocar elementos como la batería, por lo que el espacio disponible total es de 70.4mm, el total del interior de la caja.

La fijación de pantalla y batería jugaron un papel importante también en la elección de la altura de la caja. La pantalla queda suspendida sobre la PCB principal mediante una conexión a pines thru-hole. A pesar que el fabricante no proporciona información acerca de sus dimensiones, se han realizado medidas in situ gracias a la disposición de existencias en el laboratorio. Midiendo su altura total mediante un calibrador, se obtiene un valor de 2cm.



Figura 64. Dimensiones de la pantalla

Teniendo en cuenta también el grosor de la PCB, el cual es de 1.6 mm, es posible calcular el espacio sobrante disponibles de la siguiente forma:

$$70.4\text{ mm} - 1.6\text{ mm} - 20\text{ mm} = 49.8\text{ mm}$$

Este espacio es superior al necesario para albergar la batería, cuyo modelo 18650, tiene un espesor de 18mm.

Por otro lado, esta batería debe ir en un porta-baterías para después conectarlo a la PCB principal. Este factor delimita el espacio longitudinal necesario. El hueco máximo disponible es de 75mm, mientras que un porta-baterías común para los modelos 18650 suele rondar los 66.5-70mm

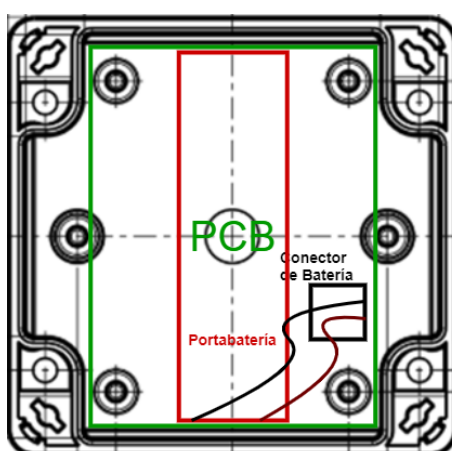


Figura 65. Posicionamiento de la batería en la caja

En la figura 65 se muestra de forma representativa el ajuste del porta-batería en el hueco de la caja. Como es posible observar, no había posibilidad de incluir el conector de la PCB en la parte final del porta-baterías por falta de espacio y se fijó a un lado.

4.5.5 Probeta del sensor

Para poder comunicar la PCB principal con el sensor es necesario un elemento que quede ensamblado al conector PX0410. Este elemento debe alojar la placa del sensor y permitir a través de él el paso de los cables que conectan al sensor. Mediante la información del fabricante, se ha podido saber que el hueco que ofrece el PX0410 para poder insertar elementos es de 7.2 mm de diámetro como máximo. Es decir, este es el grosor máximo que debe tener la pieza que conducirá los cables de conexión por su interior.

Los planos y medidas de las piezas que se van a tratar a continuación se encuentran en el *Anexo D*.

Para empezar, se ha diseñado un cabezal de policarbonato. Tanto esta pieza como las siguientes se muestran en la Figura 67. La razón de elegir policarbonato es la resistencia que ofrece a golpes y temperaturas.

La superficie de éste tiene una parte roscada y una parte lisa. La primera se usará para unir todos los elementos mediante un anillo fijador. La parte lisa tiene la función de ser el límite de rosca para este anillo.

Para realizar la pieza se han usado dos perfiles circulares, uno para la parte más ancha y otro para el tubo. Ambos con las medidas apropiadas. Después se extruyeron los perfiles para generar la forma final y se generó una rosca en la mitad externa inferior. Por último, se creó el hueco para el soporte de la PCB a partir del perfil del mismo.

Hablando del soporte, va a ser fabricado con TPU. Se ha previsto en su interior de un hueco en el que tanto la PCB como el conector encajan perfectamente, sujetándose y evitando de cualquier modo que los componentes se salgan de su sitio. Dichos huecos tienen las dimensiones de la PCB y el conector junto con los cables, permitiendo que no haya juego en el ajuste. Para realizar esta pieza se partió de un cilindro extruido. El siguiente paso fue generar uno a uno los agujeros internos de la pieza, donde quedarán alojados los componentes.

Después, se creó un dibujo (*sketch*) con la forma dentada que se puede ver en la Figura 66. A partir de esta forma se generó un patrón circular para que quedaran repartidos por todo el perímetro de la pieza. La razón de crear esta forma dentada es, principalmente, el de conseguir una mayor sujeción.

Para ello, se aumenta la superficie de contacto entre el soporte, el cabezal y la pieza de agarre (de la que se hablará a continuación), puesto que es mayor que la de un cilindro común. La creación de la forma se ha realizado mediante unos cálculos que se detallarán más adelante.

Para verificar que esta solución aporta ventajas respecto a un cilindro estándar, se va a comparar el área exterior efectiva de un cilindro cuyo radio es el externo del perfil diseñado, con el área exterior del soporte final. Se van a utilizar las medidas planteadas en los planos para calcular dichos áreas.

El área externa de un cilindro se define como $A = 2 * \pi * R * h$, con $h =$ longitud del soporte.

Para el caso de usar las medidas del diseño, este valor es $A = 1382.30 \text{ mm}^2$

En el caso del soporte, los cálculos son más complejos. Para empezar, habría que distinguir tres zonas del perfil. El diente, el valle entre dientes, y las paredes que comunican los dientes y los valles. De esta forma, se define el área externa total como:

$$A_{total} = (A_{diente} + A_{valle} + 2 * A_{pared}) * n,$$

siendo $n =$ número de dientes

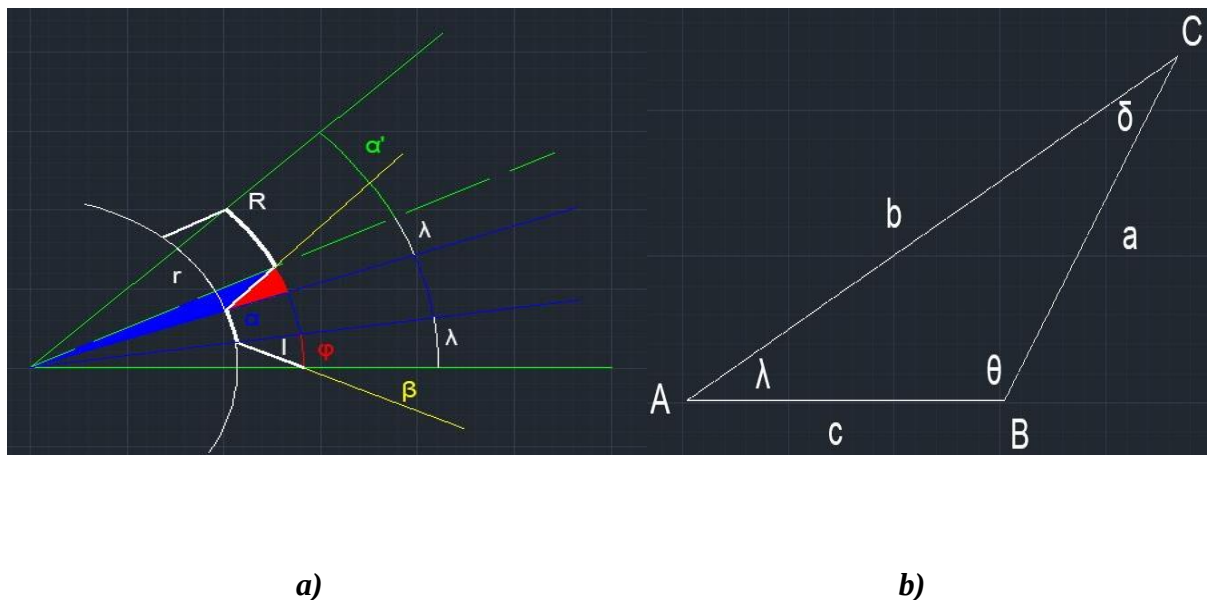


Figura 66. Angulos y medidas del perfil del soporte. Imagen a) descomposición angular de la forma. b) detalle del triángulo azul de la imagen a)

Dentro de los parámetros que se pueden ver en la imagen, se conocen R y r , siendo estos el radio externo e interno del soporte, respectivamente. Además, se conoce el ángulo β , de 83.5° y la magnitud l , de 1.5mm .

Para empezar, se calcula el área del valle. Esta depende de la longitud de arco del ángulo α . Este se puede calcular a partir del ángulo β (amarillo), el ángulo φ (rojo), y las magnitudes l , r y R , a partir de la relación:

$$\cos(\varphi) = \cos\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right) = \frac{R - r}{l}$$

ya que, observando la figura, se puede ver cómo $\varphi = \frac{\beta - \alpha}{2}$, y l es el lado mayor contiguo a dicho ángulo. De esta forma, α quedaría como:

$$\alpha = \beta - 2 * \cos^{-1}\left(\frac{R - r}{l}\right)$$

Teniendo todos los ángulos en radianes, la longitud de arco del valle correspondería a:

$$L_{\text{valle}} = \alpha * r = r * \left(\beta - 2 * \cos^{-1}\left(\frac{R - r}{l}\right)\right)$$

Con lo que:

$$A_{\text{valle}} = h * r * \left(\beta - 2 * \cos^{-1}\left(\frac{R - r}{l}\right)\right)$$

A continuación, se calcula el área de las paredes. Esta es directamente:

$$A_{\text{pared}} = 2 * l * h$$

Por último, hay que calcular el área correspondiente al diente.. Primero, es necesario entender que los dientes delimitan tramos equidistantes de la circunferencia. Es decir, si el soporte tiene 8 dientes, quiere decir que hay 8 tramos con el mismo número de grados en la circunferencia. Quiere decir, que cada tramo recorre un arco de:

$$\frac{2\pi}{n} = \frac{360^\circ}{n}$$

Esta es la distancia angular que separa un diente a otro. Teniendo en cuenta los arcos del valle y del diente:

$$\frac{2\pi}{n} = \alpha + \alpha' + 2 * \lambda,$$

donde α' es el arco del diente, y λ es el ángulo que se forma desde

el centro de la circunferencia entre los puntos de inicio y fin de la longitud de la pared

Para calcular λ es necesario ver el triángulo azul de la Imagen a) de la Figura 66, donde l , r y R forman un triángulo obtuso.

A partir de los lados de este triángulo, se puede calcular el ángulo de interés, λ , a partir del Teorema del Coseno:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 * a * b * \cos (\lambda)$$

$$l^2 = R^2 + r^2 - 2 * R * r * \cos (\lambda)$$

Por lo que se puede despejar λ :

$$\lambda = \cos^{-1}(l^2 - R^2 - r^2 + 2 * R * r)$$

Gracias a este procedimiento, se puede despejar α' para calcular la longitud de arco del diente:

$$\begin{aligned} L_{diente} &= R * \alpha' = R * \left(\frac{2\pi}{n} - \alpha - 2\lambda \right) = \\ &= R * \left(\frac{2\pi}{n} - \alpha - 2(\cos^{-1}(l^2 - R^2 - r^2 + 2 * R * r)) \right) \end{aligned}$$

Por tanto, ya se puede calcular el área externa total correspondiente al soporte. Este valor sería de:

$$\begin{aligned} A_{total} &= n * \left(h * r * \left(\beta - 2 * \cos^{-1} \left(\frac{R - r}{l} \right) \right) + 2 * l * h + \right. \\ &\quad \left. + R * \left(\frac{2\pi}{n} - \alpha - 2(\cos^{-1}(l^2 - R^2 - r^2 + 2 * R * r)) \right) \right) \end{aligned}$$

Despejando los valores por los del diseño, se obtiene un área de: 1523.36 mm²

Como se puede observar, el área es mayor, lo que garantizará mejor sujeción. Con este desarrollo se puede diseñar cualquier forma dentada a partir de los requisitos que se planteen.

Además de todo esto, los huecos que se generan en el cilindro para producir la forma del soporte disminuyen el peso total del componente. Es más, el perfil dentado permite evitar cualquier tipo de rotación del soporte dentro del resto de componentes que pueda producir torsión sobre los cables de conexión y terminar dañándolos.

La pieza estará hecha de TPU. Este material proporciona suficiente aislamiento, además de ser flexible, lo que ayuda a poder poner y quitar la PCB de su interior cuando se precise. El soporte sostiene la PCB mediante un hueco anular interno con las dimensiones exactas de la placa. Así se evita que se ejerza tensión al conector y sus cables.

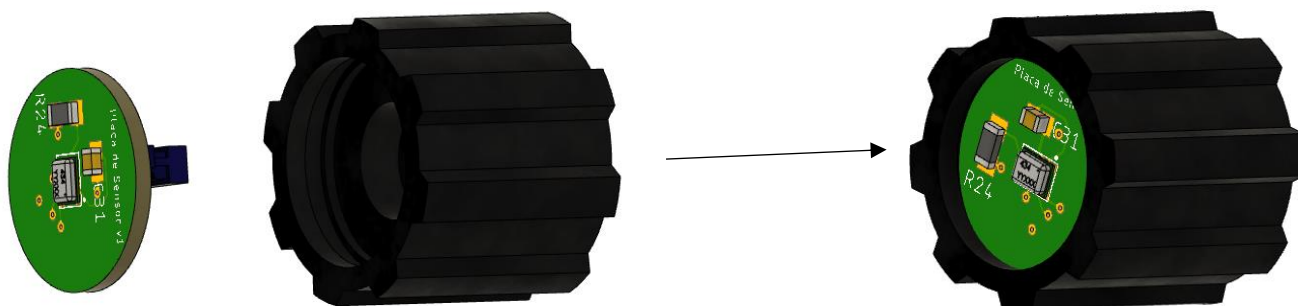
Por último, se ha diseñado un sistema de rosca para ser capaz de fijar la espuma antiviento con el resto del conjunto. Esta espuma es la que se usa en los micrófonos comerciales. Para ello se ha partido de un cilindro. En primer lugar, se generó el hueco correspondiente al soporte de la PCB. Este hueco permite que el soporte se quede fijo y apoyado. En el otro extremo se realizó un apertura suficientemente grande para no estorbar las medidas de sonido del sensor. Por la cara externa se realizaron los pasos de rosca necesarios. Esta pieza estará unida al resto de la probeta mediante el anillo fijador. Al igual que la probeta, ambos componentes estarán hechos de policarbonato.

Se ha escogido el uso de plástico para las piezas ya que pueden ser fabricadas mediante impresión 3D. Este punto será tratado más adelante.

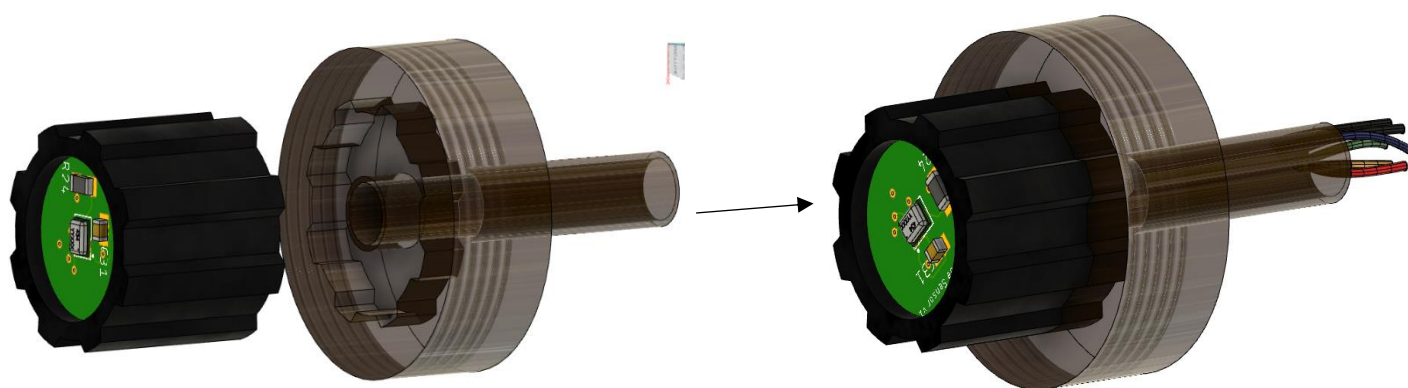


Figura 67. Modelo en 3D de las partes de la probeta para el sensor. Imagen a). De abajo a arriba: espuma antiviento, conector para la espuma, anillo fijador, soporte de TPU, cabezal para las conexiones. Imagen b) Conjunto ensamblado

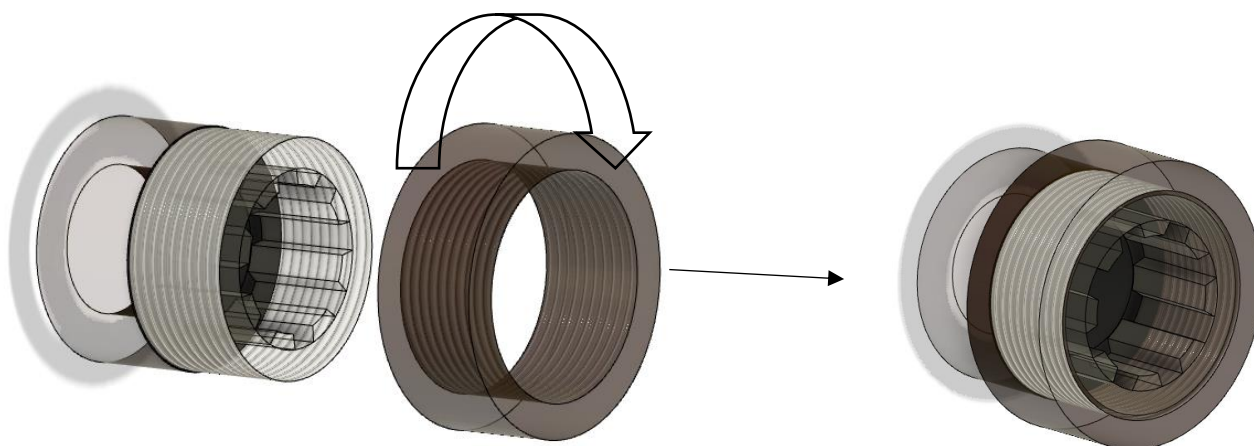
El procedimiento para el ensamblaje es el siguiente:



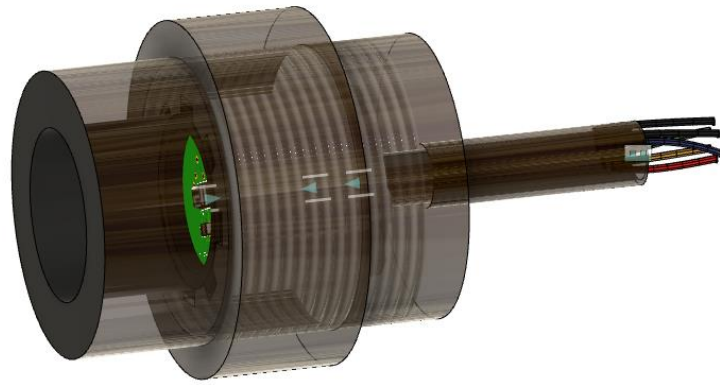
1)



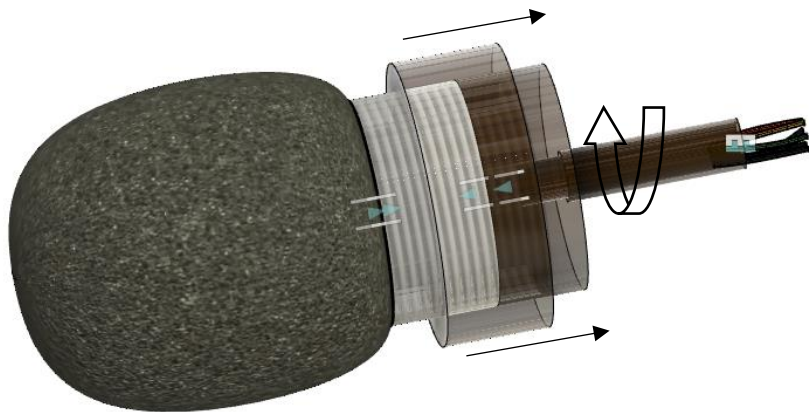
2)



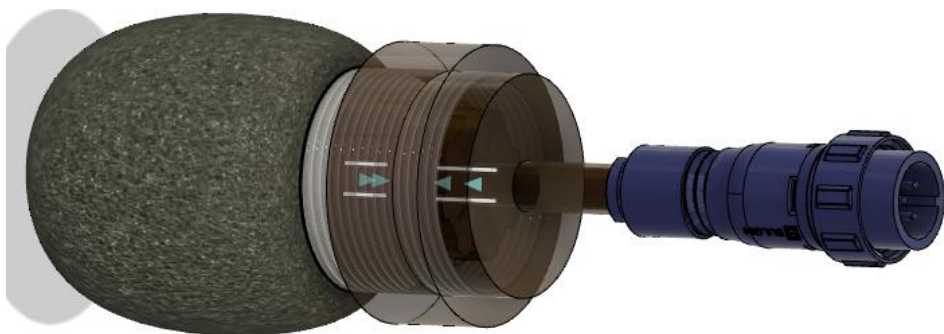
3)



4)



5)



6)

Figura 68. Ensamblaje de la probeta

Nota: los cables de conexión no se han representado en su totalidad para simplificar los dibujos y que pudiesen caber en la hoja. En la explicación se hace mención a ellos para recordar que están ahí, explicando por donde deben ir.

En primer lugar, se introduce la PCB con el conector JST y los cables de conexión a través del soporte diseñado (Imagen 1). Una vez quede fijo en su alojamiento, se debe encajar el soporte con los cables en el hueco del cabezal, con la precaución de que vayan por el conducto destinado para ellos. (Imagen 2)

Por otra parte, está la pieza que fija la espuma protectora antiviento. Esta pieza está compuesta por una parte lisa, donde irá acoplada la espuma, y una parte roscada que quedará unida al soporte del micrófono mediante un anillo fijador (Imágenes 3 y 4). Una vez hecho esto, se procede al ajuste del anillo fijador roscándolo hasta el tope en el cabezal de la probeta (Imagen 5) y acoplar la espuma antiviento.

Por último, hay que seguir el procedimiento descrito en el punto 4.5.1 para acoplar el conector PX0410, y ya estaría completamente lista la probeta para el sensor.

Tal y como se comentó al inicio de este punto, las piezas se pueden fabricar en 3D. Para ello, desde Fusion 360 se pueden guardar las piezas en formato .stl para después incorporarlo a algún software de impresión 3D, o bien se puede hacer desde el mismo espacio de trabajo. Al usar esta opción, se puede acceder directamente a otros software, como pueden ser *Print Studio*, *Cura* o *MeshMixer*. Cuando alguno de estos programas está instalado, Fusion 360 lo detecta y, automáticamente, genera el mallado necesario para que el software de impresión 3D pueda operar con él.

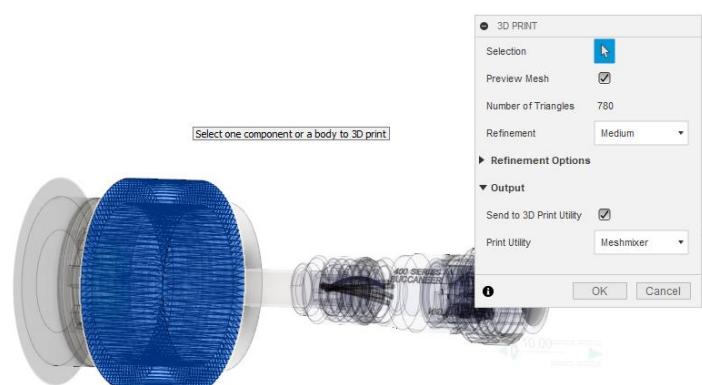


Figura 68. Mallado de las piezas del modelo para su posterior impresión

MeshMixer es el software más completo de los tres mencionados y permite modificar, reparar y trabajar con los archivos .stl generados, además de ofrecer la opción básica de conectarse con la impresora correspondiente para fabricar las piezas. Puesto que las medidas de las piezas estaban ya definidas en el modelado 3D, los archivos .stl generados están listos para ser analizados por *MeshMixer* (en busca de posibles triángulos vacíos en el mallado o errores) y ser impresos una vez se escoja el material adecuado.

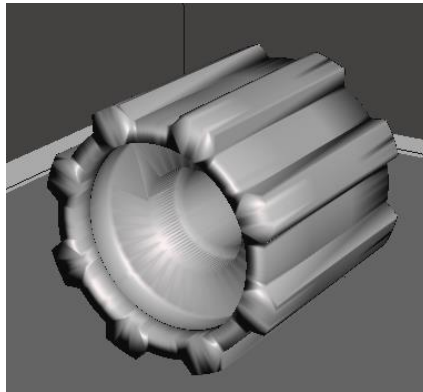


Figura 69. Imagen del soporte para la PCB del sensor en MeshMixer.

El objetivo de haber explicado de forma introductoria como usar este programa de impresión 3D no es más que para pasar por las diferentes etapas de un diseño hasta poder materializarlo. Empezar desde un plano, pasando a un diseño 3D, para finalizar en un archivo que esté listo para ser fabricado mediante impresión. Cabe destacar que lo realmente importante y fundamental del proyecto es la etapa de diseño.

4.6 Despiece del dispositivo y montaje final

Una vez descritas las piezas más importantes, se va a completar el trabajo añadiendo las partes necesarias del modelo para completar la estructura final del dispositivo. Para ello es necesario incluir la pantalla y la batería, así como los soportes y tornillos sobre los que estará apoyada la PCB, al igual que los cables de conexión de las diferentes partes. En los **Anexos D y E** se detallan los planos del sistema y los modelos 3D de las diferentes piezas en Fusion360.

Para ensamblar las piezas se hizo uso de las funciones del apartado *Assembly* del programa *Fusion360*. En primer lugar se introdujo el modelo de la batería dentro de la

caja. Por otro lado, se comprobó exhaustivamente la compatibilidad de la PCB dentro de la caja así como la correcta alineación con los agujeros de la misma para poder ensamblarla. Una vez se ha revisado este hecho, es momento de hacer los agujeros necesarios para la inclusión de la antena y la probeta que contendrá las conexiones y la PCB del sensor, así como la salida para el cable USB.

Para la colocación de estos conectores se ha tenido en cuenta una serie de factores. El conector de la antena y el del USB requieren estar en la posición inferior de la caja para una mayor protección frente a parámetros ambientales adversos como lluvia. Por otro lado, el conector de la antena debe estar en un lateral. Además de ello, hay que saber que cada conector ocupa un espacio dentro de la caja, por tanto, deben estar situados por detrás de la PCB principal, ya que esta ocupa todo el frontal de la caja. Si no fuese así, sería imposible incluir la PCB y extraerla fácilmente, además de empeorar la visibilidad de la pantalla, ya que ésta se encontraría más al fondo. En todo momento se ha procurado que los conectores internos estén lo más cerca posible del puerto de la PCB que se corresponde con ellos.

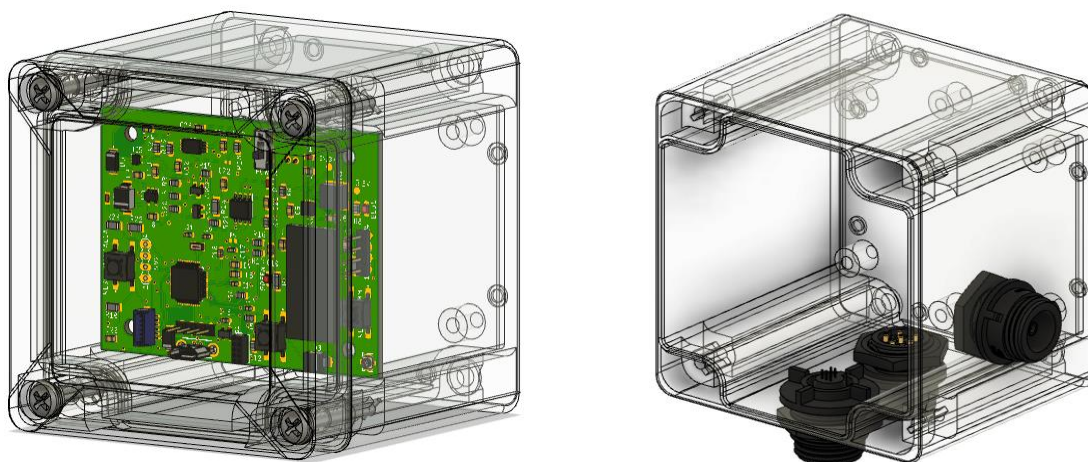


Figura 70. Situación de la PCB y conectores dentro de la caja

A continuación, se procede a incluir los separadores que actuarán como soporte de la PCB, además de fijarla en la caja. Estos son separadores de rosca métrica M4 y longitud 20mm. Teniendo en cuenta que la batería, junto con su porta-baterías ocupa 20 mm de ancho, y que el conector de la antena tiene un diámetro de 19 mm, se han escogido separadores de 20 mm para que la PCB esté a una distancia de 40 mm respecto a los

agujeros de la caja. Para ello, se usarán dos separadores, más un tercero que se roscará por encima de la PCB, tal y como se puede ver en la Figura 71.

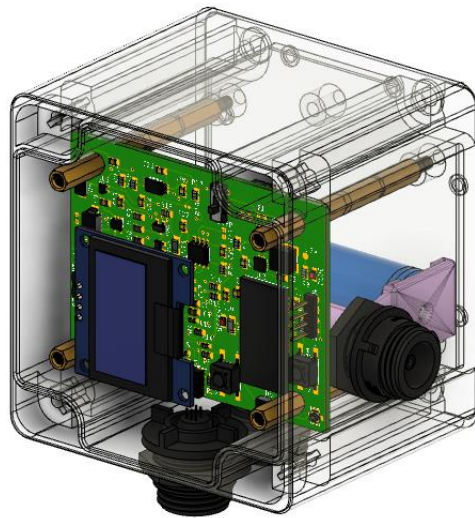


Figura 71. Inclusión de los soportes junto con la PCB y la pantalla

Por último, hay que conectar el resto de elementos externos para terminar de darle forma al dispositivo. Esto requiere la inclusión de la antena, la probeta del sensor y los cables USB como de señales externas e internas a la caja, así como de la tapa posterior y los tornillos de cierre de la caja.

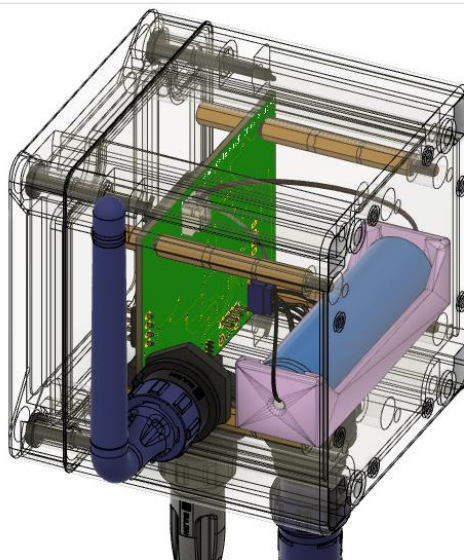


Figura 72. Diseño final del modelo y detalles interiores de la caja

Antes de concluir es importante mencionar que la única parte transparente en la caja es la parte frontal, la cual, permitirá la visibilidad de la pantalla LED. Es por ello que, el diseño mostrado en las imágenes anteriores es debido a un efecto aplicado en el programa para poder ver su interior. En el *Anexo E* se incluye una imagen completa del diseño tal y como se vería realmente. Todas las imágenes han sido extraídas del modelo general que se ha realizado en el programa *Fusion 360*.

4.7 Presupuesto total

En el presente apartado se va a realizar un análisis sobre el coste de fabricación de los dispositivos.

Una vez escogido el resto de componentes inherentes al encapsulado del dispositivo, se procedió a realizar una búsqueda de los mismos en distintos proveedores. Al igual que en tablas anteriores, se ha contemplado la adquisición de 5 unidades por componente, para hacer una mejor aproximación del coste unitario de fabricación del dispositivo. La tabla 14 refleja la selección realizada, junto con la referencia del fabricante, unidades, proveedor y coste.

Componente	Fabricante	Cantidad por dispositivo	Cantidad total (5 dispositivos)	Proveedor	Precio
Caja IP67 TG-ABS-99-8	Spelsberg	1	5	Mouser	69.75€
Pantalla SH1106	Sino Wealth	1	5	AliExpress	16.15€
Pila 18650	Samsung	1	5	AliExpress	13.28 €
Portabaterías	KeyStone	1	5	Mouser	12.25€
JST-2-XHP-2	JST	1	5	Mouser	2.35€
JST-6-SHR-06-V	JST	2	10	Digikey	1.50€
PX0412	Bulgin	1	5	Mouser	35.20€
PX0410	Bulgin	1	5	Mouser	40.50€
PX0447	Bulgin	1	5	Mouser	53€
PX0441	Bulgin	1	5	RS Components	30.50€
PX0409	Bulgin	1	5	Farnell	108.20€
Separadores M4	Harwin	12	60	RS Components	36.36€
TPU	Smarfil Flex	1	5	Amazon	12.01€ (rollo de 330g)
Polycarbonato	Ice Filaments	1	5	Amazon	25.57€ (rollo de 500g)
Espuma antiviento	WQER	1	5	AliExpress	6.55€
				TOTAL	462.92€

Tabla 14. Presupuesto del soporte físico del sistema

Como se puede ver en la Tabla 14, se ha escogido un batería diferente a la de la marca Pirabadi. Este hecho se debe a que no se han encontrado proveedores de la misma. Como alternativa, se propone el uso de la batería de Samsung ICR18650-28A, que tiene las mismas características tanto en diseño, al ser 18650 también, como en capacidad y tensión nominal, por lo que los cálculos planteados siguen siendo válidos.



Figura 73. Batería ICR18650 de Samsung

Los rollos de impresión 3D escogidos tienen la cantidad (en gramos) más pequeña que ha sido posible encontrar para los materiales buscados. En *Fusion360* se pueden definir los materiales de los componentes, con lo que el programa puede calcular propiedades de los mismos, como por ejemplo la masa de la pieza o la densidad. Al hacerlo, se ha obtenido como resultado que el peso es de 4.597g de TPU por soporte y de 31.942g totales de Policarbonato para el resto del conjunto. Por lo que con cada rollo comprado se pueden fabricar 66 capuchones de TPU y 15 cabezales, anillos y agarres.

Component Instances (1)		Component Instances (4)	
Area	2790.091 mm^2	Area	1.495E+04 mm^2
Density	9.300E-04 g / mm^3	Density	0.001 g / mm^3
Mass	4.597 g	Mass	31.942 g
Volume	4943.54 mm^3	Volume	2.662E+04 mm^3
Physical Material	Rubber, Black	Physical Material	Polycarbonate, Bronze

Figura 74. Propiedades de los componentes de la probeta

Una vez se tienen los precios de todos los materiales necesarios para el montaje de los dispositivos, se calculó el presupuesto total necesario, teniendo en cuenta los costes de los componentes de las PCB, la fabricación de las mismas, del proceso de montaje y del resto de piezas del sistema. El valor total se corresponde a un valor bruto, no se está teniendo en cuenta los costes de adquisición del horno de soldadura o la impresora 3D (ya que se dispone de ellos en los laboratorios de la Escuela) o del transporte, así como del coste operacional de montar el sistema en la vía pública.

Desglose de Costes (€)

Componentes de las PCBs	278.64 €
Fabricación de las PCBs	49.54 €
Montaje	56.45 €
Elementos del sistema	462.92 €
TOTAL	847.45 €
Coste unitario	169.49 €

Tabla 15. Desglose de costes del sistema

Este es el presupuesto mínimo necesario para fabricar una primera tanda de dispositivos. Aunque a priori pueda parecer un precio elevado, hay que puntualizar que este tipo de sistemas sensorizados con capacidad IoT no son nada económicos. El fabricante referencia en este tipo de soluciones, Libelium [44], ofrece dispositivos a precios muchísimo superiores, rondando 30 ó 40 veces el costo de fabricación de este dispositivo.

5. RESULTADOS

En este apartado querría hablar acerca de ciertas cuestiones. En un primer momento uno de los objetivos que se perseguían en este trabajo fue el de realizar el montaje físico de las PCB y del sistema completo para poder realizar pruebas de campo.

Por desgracia, la situación en la que se encuentra el mundo a causa del COVID-19 derivó en que se decidiese modificar el alcance del proyecto y algunos objetivos. Debido a ello, se optó por realizar el diseño y el modelaje de la estructura física y de soporte del sistema, así como detallar más en profundidad los aspectos económicos.

Se ha conseguido diseñar de forma óptima un mecanismo para la sujeción del sensor, teniendo en cuenta diversos factores, desde los materiales y el acoplamiento de las diferentes piezas, hasta su procesado para poder imprimirlas en 3D.

Gracias a este trabajo, además de todo el resto de piezas que forman el sistema completo, se ha mejorado profundamente en el manejo de software CAD de diseño mecánico en 3D, así como en el uso de CAD electrónico. En este caso, se ha evolucionado la primera versión del dispositivo, añadiendo funcionalidades hardware más interesantes consiguiendo menor consumo (caso de la pantalla OLED), mejorando las capacidades de comunicación gracias a la incorporación y adaptación de un nuevo módem de radiofrecuencia e incorporándole autonomía energética gracias a la batería y la etapa de regulación inteligente diseñada para ella.

Además, se ha conseguido desglosar de forma adecuada la estructura de costes de todo el proceso de diseño de un producto, identificando las diferentes etapas y fases que la componen, así como encontrar la solución óptima en cuanto a la calidad y el precio para cada uno de los elementos de dichas etapas.

Tal y como queda planteado en los diferentes modelos 3D, el sistema es totalmente utilizable e implantable en la vía pública.

6. CONCLUSIONES

Como conclusiones, cabe destacar que a pesar de haber sido necesario cambiar el alcance del proyecto, se ha conseguido realizar todos los puntos que se mencionan en el mismo,

desarrollando desde cero un prototipo que, a falta de su montaje y pruebas de campo puede ser plenamente funcional, tomando las precauciones y consideraciones necesarias.

Sobre el papel, el diseño planteado cubre la necesidad de poder monitorear el ruido en diferentes ambientes y tomar medidas del mismo. El uso de varias fuentes de alimentación, además de que el empleo de una u otra se active de forma inteligente (prolongando la vida útil del dispositivo) permite que el sistema sea todoterreno y duradero.

El prototipo cuenta con la capacidad de autoabastecerse energéticamente para no tener que cambiar su batería cada cierto tiempo. De esta forma se mejora en uno de los apartados que se planteó con respecto a la versión primera del Dr. Sales.

Se ha diseñado un mejor soporte para el sensor de ruido, más seguro y eficiente, lo que permitirá mejorar las condiciones en las que se mide. El estudio del sonido y este tipo de sensores ha permitido el aprendizaje profundo en un campo apasionante como es la acústica.

Por otro lado, el uso de la tecnología SigFox IoT ayuda a que el empleo del dispositivo sea transparente de cara a cualquier usuario, quien simplemente necesitará enchufar el dispositivo y este empezará a funcionar.

El diseño completo del prototipo, partiendo desde la etapa electrónica, a la mejora del código de programación, continuando con el diseño de la etapa mecánica, y desde aquí a su modelado en 3D, permite obtener un conocimiento profundo de lo que es el desarrollo de un producto. Como ya se ha mencionado, únicamente quedaría estar presente en la etapa de montaje para haber pasado por cada una de las fases del ciclo de creación del producto. Se ha tratado de un proyecto transversal a múltiples áreas del diseño y la ingeniería.

Puesto que queda pendiente la etapa experimental del prototipo, todo el conocimiento adquirido se traspasa al grupo de investigación para que realicen pruebas, además de llevar a cabo modificaciones o mejoras cuando sea oportuno. De este modo, el proyecto queda abierto a seguir evolucionando.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Pérez, F. A., & Guerra, J. G. (2017). *Internet de las Cosas*. Recuperado el 14 de 2 de 2020, de <http://revistas.uigv.edu.pe/index.php/perspectiva/article/view/187>
2. Medina O, Martha G, Elizabeth A. La importancia del control de la contaminación por ruido en las ciudades. *Ingeniería*. 2015;19(2):129–36.
3. Blauert Jens. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. 1983
4. AT-SAMD21 [Internet]. Microchip. 2020 [citado 4 abril 2020]. Disponible en: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATSAMD21G18>
5. Semiconductors P, Timing BI. I 2 S bus specification I 2 S bus specification. 1996;(February 1986):1–7.
6. BARTLETT B. Microphone Specifications. *Rec Music Locat*. 2007;1(408):97–106.
7. Podlubne A, Rosales JA, Javier A, Manzanelli U, Hugo A, Skarp O. Micrófonos Mems : Análisis Y Aplicaciones En Audición. *Mecánica Comput*. 2013;XXXII:2935–50.
8. Output SD. Low-Noise Microphone with I 2 S Digital Output. 2014;1(408):1–20.
9. NF corporation. Equivalent Input Noise. :100. Available from:http://www.nfcorp.co.jp/english/doc_portal/download/pdf/techinfo/equiv_input_noise_02.pdf
10. Digikey [Internet]. 2020 [citado 17 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.digikey.es/es/articles/techzone/2019/feb/mems-vs-ecm-comparing-microphone-technologies>
11. Lai Y. Understanding PDM Digital Audio. *Imid* 2009. 2009;1069–72.
12. InvenSense [Internet]. 2020 [citado 17 marzo 2020]. Disponible en: <https://invensense.tdk.com/products/digital/ics-43432/>
13. SigFox [Internet]. 2020 [citado 17 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.sigfox.com/en>

14. TD Next [Internet]. 2020 [citado 17 marzo 2020].
Disponible en: <http://rfmodules.td-next.com/>
15. TD 1208r [Internet]. 2020 [citado 18 marzo 2020].
Disponible en: <http://rfmodules.td-next.com/modules/td1208r/>
16. TD Next -SDK [Internet]. 2020 [citado 18 marzo 2020].
Disponible en: <http://rfmodules.td-next.com/sdk/>
17. Sinowealth [Internet]. 2020 [citado 18 marzo 2020].
Disponible en: <http://www.sinowealth.com/>
18. Autodesk-Eagle [Internet]. 2020 [citado 18 marzo 2020].
Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/eagle/features>
19. MCP73831 [Internet]. Microchip. 2020 [citado 18 marzo 2020].
Disponible en: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP73831>
20. Texas Instruments [Internet]. 2020 [citado 18 marzo 2020].
Disponible en: <https://www.ti.com/products/tcp63001>
21. Amphenol [Internet]. Amphenol ICC . 2020 [citado 18 marzo 2020]. Disponible en:
<https://www.amphenol-icc.com/fci-basics>
22. Spelsberg [Internet]. 2020 [citado 18 marzo 2020]. Disponible en:
<https://spelsberg.es>
23. Abracon [Internet]. Abracon Crystals. 2020 [citado 20 marzo 2020]. Disponible en:
<https://abracon.com/parametric/crystals>
24. Sherman L. The Basics of USB Battery Charging : A Survival Guide An Array of Power Sources. 2010;1–15.
25. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación. Inst para la Diversif y Ahorr la Energ [Internet]. 2001;100. Available from:
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_5573_GT_iluminacion_oficinas_01_dacd0f81.pdf
26. Instituto Geográfico Nacional [Internet]. MITMA-IGN. 2020 [citado 20 marzo 2020].

- Disponible en: <https://www.mitma.gob.es/geoinformacion>
27. Battery University [Internet]. 2020 [citado 20 marzo 2020].
Disponible en: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries
28. T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, and R. Jackey, “High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells,” *2012 IEEE Int. Electr. Veh. Conf. IEVC 2012*, pp. 1–8, 2012.
29. Devie A, Baure G, Dubarry M. Intrinsic variability in the degradation of a batch of commercial 18650 lithium-ion cells. *Energies*. 2018;11(5):1–14.
30. Pózna AI, Hangos KM, Magyar A. Temperature dependent parameter estimation of electrical vehicle batteries. *Energies*. 2019;12(19):1–17.
31. ON SEMICONDUCTORS [Internet]. 2020 [citado 20 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC74VHC1G125-D.PDF>
32. Maxim Integrated [Internet]. MAX9142. 2020 [citado 20 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/amplifiers/MAX9142.html>
33. Texas Instruments [Internet]. TPS2113. 2020 [citado 20 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.ti.com/products/tps2113a>
34. Mac Lean DN. Simulation of average current mode control switching power supplies. *Proc Intersoc Energy Convers Eng Conf*. 1991;1:218–23.
35. Nexperia [Internet]. 2020 [citado 20 marzo 2020].
Disponible en: <https://www.nexperia.com/>
36. Panasonic [Internet]. 2020 [citado 20 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.panasonic-electric-works.com/es/>
37. J. T. Bailey, “Substrate Materials,” *Concise Encycl. Adv. Ceram. Mater.*, pp. 466–468, 1991.
38. Boletín Oficial del Estado [Internet]. 2020 [citado 23 marzo 2020].

Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2011-81307>

39. Máquinas Pick & Place [Internet]. AB Electronics. 2020 [citado 24 marzo 2020].

Disponible en: <http://www.ab-electronic.com/c80/productos-prototipos-y-baja-produccion>

40. Iman Temporing [Internet]. 2020 [citado 24 marzo 2020]. Disponible en:

<http://imancorp.es/es>

41. TempJob [Internet]. 2020 [citado 24 marzo 2020]. Disponible en:

<http://www.tempjob-ett.com/es/>

42. Salarios Técnico Soldador [Internet]. Indeed. 2020 [citado 24 marzo 2020]. Disponible en:

<https://www.indeed.es/salaries/soldador-Salaries?period=hourly>

43. Bulgin [Internet]. 2020 [citado 29 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.bulgin.com/us/products/range.html>

44. Libelium [Internet]. 2020 [citado 31 marzo 2020]. Disponible en: <http://www.libelium.com/products/plug-sense/>

ANEXO A: Código de Programación del Sistema

En el presente anexo se muestran las mejoras que se han realizado en el código de programación del dispositivo. Estas mejoras han venido de la mano del uso de una serie de librerías. Para comprobar su funcionamiento, se han estudiado los archivos fuente (.cpp) y de cabecera (.h) de cada una de ellas. De esta forma, si se requiere de una función que no está adaptada a los módulos del sistema, esta pueda ser modificada.

Tal y como se mencionó en el punto 3, se ha incluido la programación necesaria para la pantalla OLED que se va a incluir, haciendo uso de unas librerías específicas para ella:

<Adafruit_GFX.h>, <Adafruit_SSD1306.h>. Estas librerías contienen las funciones que habilitan la escritura por pantalla, a través del protocolo I²C. Permiten modificar la fuente, la posición inicial de escritura por pantalla, la orientación, etc.

```
size_t Adafruit_GFX::write(uint8_t c) {
  if (!gfxFont) { // 'Classic' built-in font

    if (c == '\n') { // Newline?
      cursor_x = 0; // Reset x to
      cursor_y += textsize_y * 8; // advance y
    } else if (c != '\r') { // Ignore car
      if (wrap && ((cursor_x + textsize_x * 6)
        cursor_x = 0;
        cursor_y += textsize_y * 8; // advance
      }
      drawChar(cursor_x, cursor_y, c, textcolor
        textsize_y);
      cursor_x += textsize_x * 6; // Advance x
    }
  }
}

void Adafruit_GFX::setRotation(uint8_t x) {
  rotation = (x & 3);
  switch (rotation) {
    case 0:
    case 2:
      _width = WIDTH;
      _height = HEIGHT;
      break;
    case 1:
    case 3:
      _width = HEIGHT;
      _height = WIDTH;
      break;
  }
}
```

Imagen 1. Ejemplo de funciones de escritura en la pantalla OLED. Archivo Adafruit_GFX.cpp

Dentro del código, se han introducido diferentes funciones para escribir en la pantalla. En primer lugar, se habilitó una cabecera específica para configurar la pantalla:

```
/*//////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
  Proyecto:
  Sistema de tele-medición de ruido ambiente v2.

  Autor: Miguel Jaramillo Rosado

  Configuración de la pantalla

  ////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////*/
#define SCREEN_WIDTH 64 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 128 // OLED display height, in pixels
```

```

/*-----ASI SE DEFINE ROTACION---*/

#define OLED_RESET      -1 // El RESET de la pantalla será el mismo que
                          // el del uC

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);

```

En primer lugar, debido a que la pantalla va a estar vertical, se han invertido los ejes alternando los valores de ancho y alto que las funciones usan implícitamente. En la llamada inicial a `display`, se definen dichas orientaciones, que se use I²C (mediante la función `Wire`) y el `RESET`.

En el caso de la función `setup()` de la pestaña principal del código, se han definido los diferentes parámetros de escritura, como la dirección I2C, el tamaño de los caracteres, el color, etc. También se ha definido el pin que leerá el nivel de voltaje de la batería

```

:

#include "NoiseSensor.h"
#include "Transmission.h"
#include "Alarm.h"
#include "DataLogger.h"

#define pin_bateria 7

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

    NoiseConfiguration(); //Configuración Sensor Sonómetro

    //SIGFOX
    if (!SigFox.begin()) // Something is really wrong, try rebooting
    {
        reboot();
    }

    SigFox.end(); //Send module to standby until we need to send a
message
    AlarmConfiguration();
    temp = millis();

    display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x78); //genera 3.3V para la
pantalla en la direccion marcada desde la alimentacion
    display.setTextColor(WHITE, BLACK);
    display.setTextSize(2);
    display.setCursor(100, 24);
    display.write(";HOLA!"); //mostrar por pantalla ;HOLA! al ini-
ciar
    display.display(); //pantalla de transicion. Necesaria para
mostrar por pantalla elementos
    delay(2000);

```

```

// Clear the buffer
display.clearDisplay();
pinMode(pushbutton_pantalla, INPUT);
pinMode (pin_bateria, INPUT);
}

```

Por otro lado, en la función `loop()` de la pestaña principal se ha añadido lo siguiente:

```

void loop()
{
    hora();
    bateria();
    //DISPLAY
    buttonState = digitalRead(pushbutton_pantalla);
    if (buttonState == LOW) {
        display_time = true;
    }
    else display.setTextSize(2);
    display.setCursor(100, 0);
    display.print(hours);
    display.print(":")
    display.print(minutes)
    display.print(":")
    display.print(seconds)//que se muestre la hora y la bateria
    display.setCursor(120, 0);
    display.print("BATERÍA = ");
    display.print(SOC);
    display.print(" %");
    display.display();
    //
}

```

En este trozo de código se ha pretendido mostrar los niveles de batería y la hora por pantalla cuando se pulse el botón correspondiente. Se puede apreciar la forma en la que se ejecuta la escritura. Las funciones `hora()` y `batería()` se encargan de calcular los parámetros que se necesitan.

Para calcular la hora, se hace uso del RTC que incorpora el microcontrolador (*Real Time Clock*)

```

void hora() {
    seconds = rtc.getSeconds();

    if(seconds == 60){
        seconds = 0;
        minutes += 1;

        if (minutes == 60){
            hours += 1;
        }
    }
}

```

Para estimar el nivel de carga de la batería, en primer lugar, se ha usado uno de los pines del ADC del microcontrolador. El SAMD21 dispone de resolución adaptable entre 10 y 12 bits. En este caso se ha usado la máxima resolución disponible para ganar mayor precisión en la medida de voltaje. El valor digital que arroje el ADC se escala para convertirlo en un nivel numérico de hasta 4.2 V. Una vez realizado este proceso se realizó un cálculo para estimar el SoC. La función se trata de un modelo matemático de la curva de descarga de una batería. El modelo y los parámetros se obtuvieron usando una herramienta de Matlab que permite ajustar cualquier curva a un modelo. Esta estimación no es 100% exacta, ya que no se está teniendo en cuenta la caída de tensión debido a la resistencia interna de la batería. Sin embargo, esta caída está en el orden de los mV por lo que se asumió ese pequeño error.

```
void bateria() {

//Batería
float p1 = -1.655;
float p2 = 20.13;
float p3 = -81.61;
float p4 = 110.3;
float q1 = -18.14;
float q2 = 130.8;
float q3 = -468;
float q4 = 829.2;
float q5 = -579.8;
int batt_lvl;
int SOC;

    analogReadResolution(12);
    batt_lvl = analogRead(pin_bateria) * 3.3 / 4095; //ADC de 12 bits
    con entrada máx. de 3.3V
    int x = (4.2/3.3) * batt_lvl;
    /*---Algoritmo para calculo de SoC: aproximación de la curva OCV-SoC
    a un modelo matemático usando cálculos de Matlab---*/

    SOC = (p1 * x ^ 3 + p2 * x ^ 2 + p3 * x + p4) / (x ^ 5 + q1 * x ^ 4
    + q2 * x ^ 3 + q3 * x ^ 2 + q4 * x + q5);

}
/*
```

A la hora de comunicar el dispositivo con la red SigFox, se ha tenido que estudiar el funcionamiento del módem. Este se comunicará a través del puerto serie con el microcontrolador. La razón de usar este puerto es que se deben emplear una serie de comandos AT para la comunicación (<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Sigfox-AT->

[commands.html](#)) Estos comandos permiten que el módem realice las funciones que le correspondan, ya sea enviar datos, recibirlos, etc

```
#define SIGFOXMOD_TX (38)
#define SIGFOXMOD_RX (37)

SoftwareSerial SigFoxSerial(SIGFOXMOD_RX, SIGFOXMOD_TX); // RX, TX

TD1208 td1208(&SigFoxSerial);

typedef struct __attribute__((packed)) sigfox_message
{
    int8_t Leq1, Leq2, Leq3, Leq4, Leq5, Leq6, Leq7, Leq8, Leq9, Leq10;
} SigfoxMessage;

SigfoxMessage msg; // stub for message which will be sent

void transmitir()
{
    int Leq1, Leq2, Leq3, Leq4, Leq5, Leq6, Leq7, Leq8, Leq9, Leq10;

    Leq1 = minutos[0]; msg.Leq1 = Leq1;
    Leq2 = minutos[1]; msg.Leq2 = Leq2;
    Leq3 = minutos[2]; msg.Leq3 = Leq3;
    Leq4 = minutos[3]; msg.Leq4 = Leq4;
    Leq5 = minutos[4]; msg.Leq5 = Leq5;
    Leq6 = minutos[5]; msg.Leq6 = Leq6;
    Leq7 = minutos[6]; msg.Leq7 = Leq7;
    Leq8 = minutos[7]; msg.Leq8 = Leq8;
    Leq9 = minutos[8]; msg.Leq9 = Leq9;
    Leq10 = minutos[9]; msg.Leq10 = Leq10;

    SigFoxSerial.Begin(9600);
    delay(100);
    if (td1208.sendAT()){
        Serial.println("Listo");
    }
    else
    {
        Serial.println("Algo esta fallando...");
    }
}

td1208.sendPayload((String) &msg);
}
```

Para habilitar la comunicación de forma sencilla se ha usado la librería <SigFox.h>, que incluye los archivos TD1208.cpp y TD1208.h.

De forma sencilla, en esta librería se definen las iniciales AT necesarias. Una de ellas para la comunicación con el módulo, y otra, AT\$S que da la señal de aviso para que el módem envíe los datos de radiofrecuencia.

```

*/
#include "TD1208.h"

#define ATOK "OK"
#define ATCOMMAND "AT"
#define ATSIGFOXTX "AT$SS="
#define ATTEMPERATURE "ATI26"

#define ATCOMMAND_TIMEOUT (3000)
#define ATSIGFOXTX_TIMEOUT (30000)

TD1208::TD1208(SoftwareSerial* serialPort)
{
    TD1208::serialPort = serialPort;
}

bool TD1208::sendAT()
{
    return sendATCommand(ATCOMMAND, ATCOMMAND_TIMEOUT, nullptr);
}

bool TD1208::sendPayload(const String payload)
{
    String message = (String) ATSIGFOXTX + payload;
    String data = "";
    if (sendATCommand(message, ATSIGFOXTX_TIMEOUT, &data))
    {
        Serial.println(data);
        return true;
    }
    else
    {
        return false;
    }
}

```

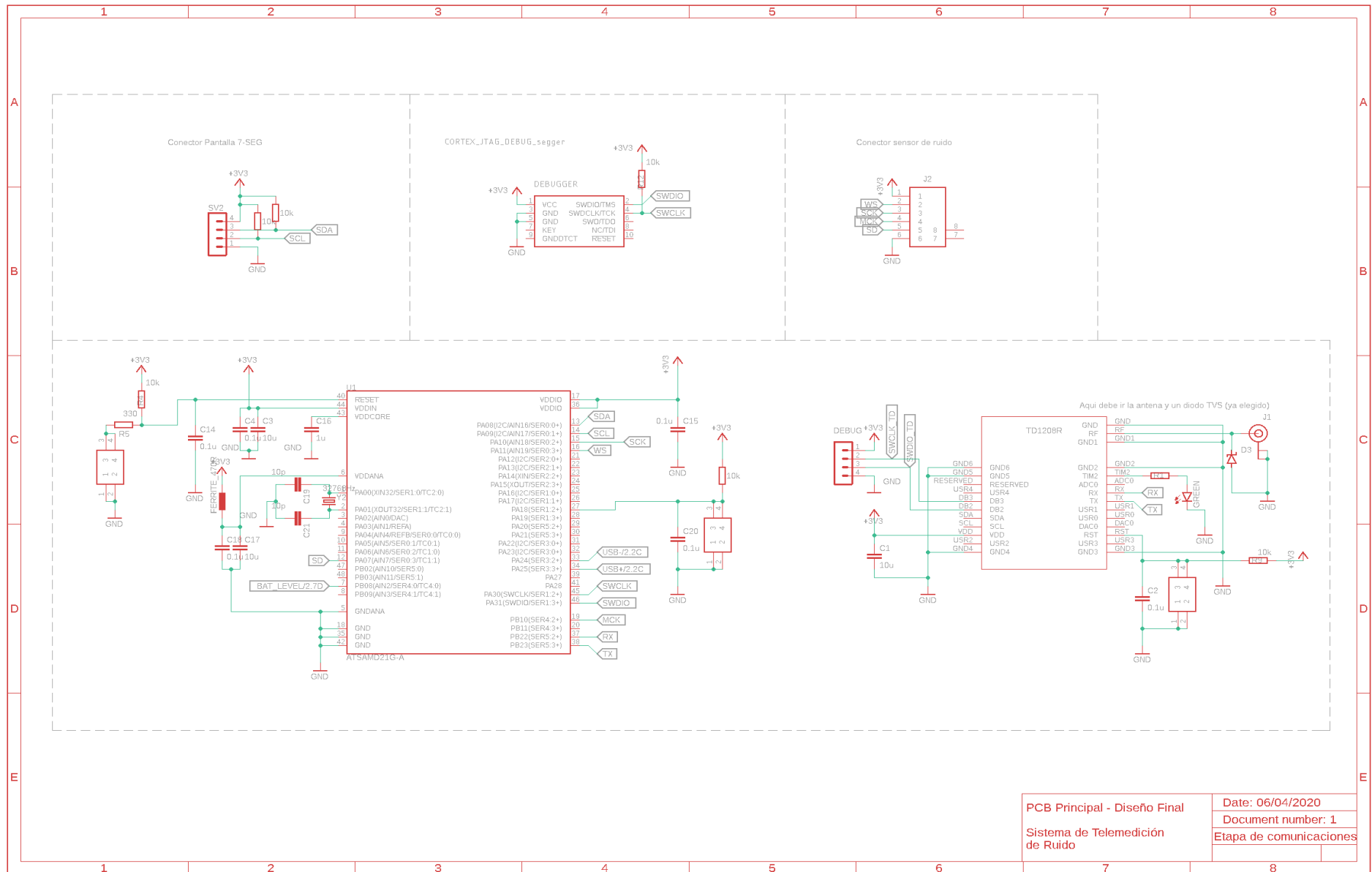
Imagen 2. Ejemplo de funciones de escritura para comunicación serie. Archivo SigFox.h

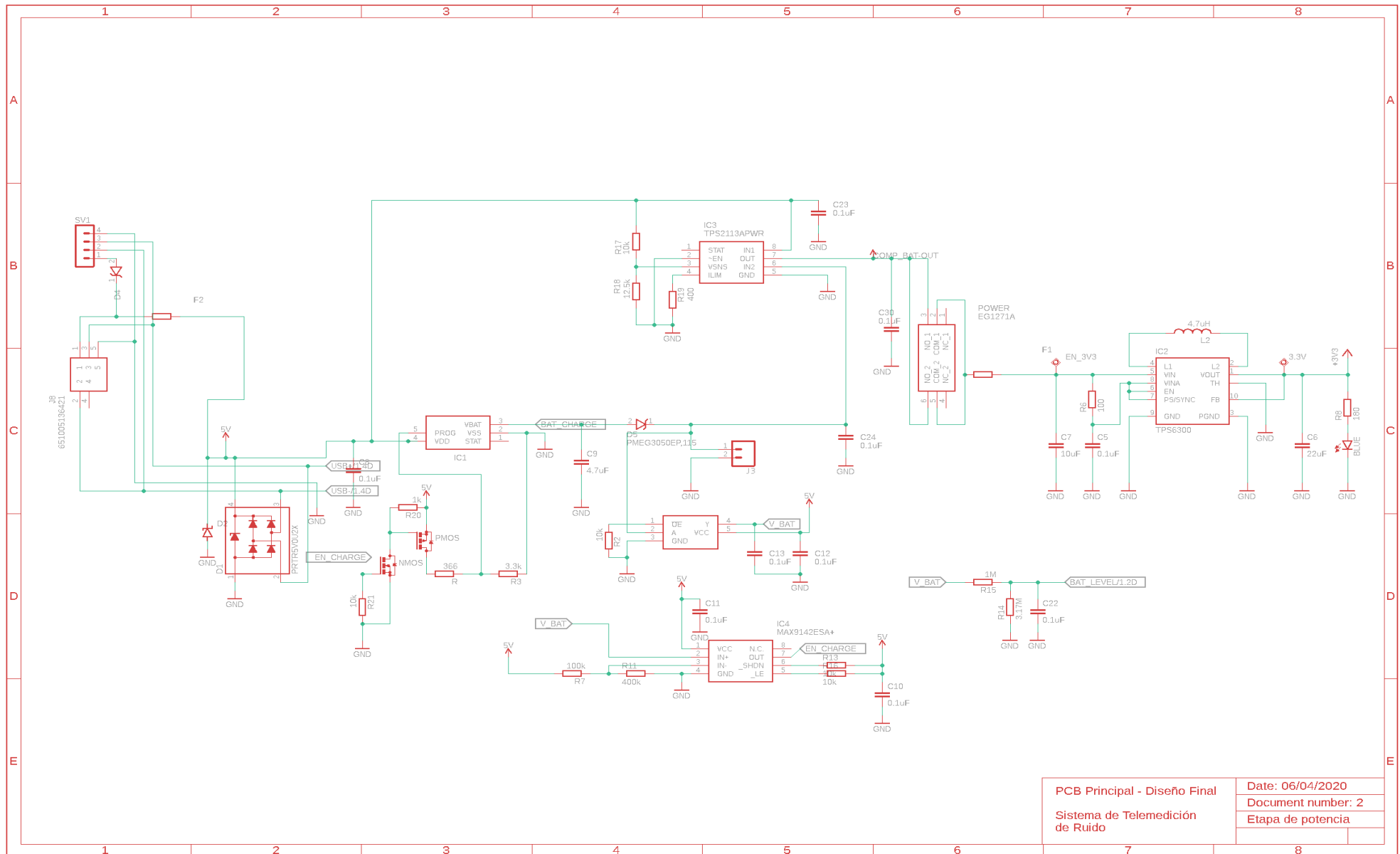
Los promedios minutales de ruido se almacenan minuto a minuto, y, cuando se alcanzan 10 minutos, se envían al módem mediante comunicación serie y se da la orden de que éste lo envíe al backend de SigFox.

ANEXO B: Esquemáticos del Sistema de Telemedición de Ruido Ambiente

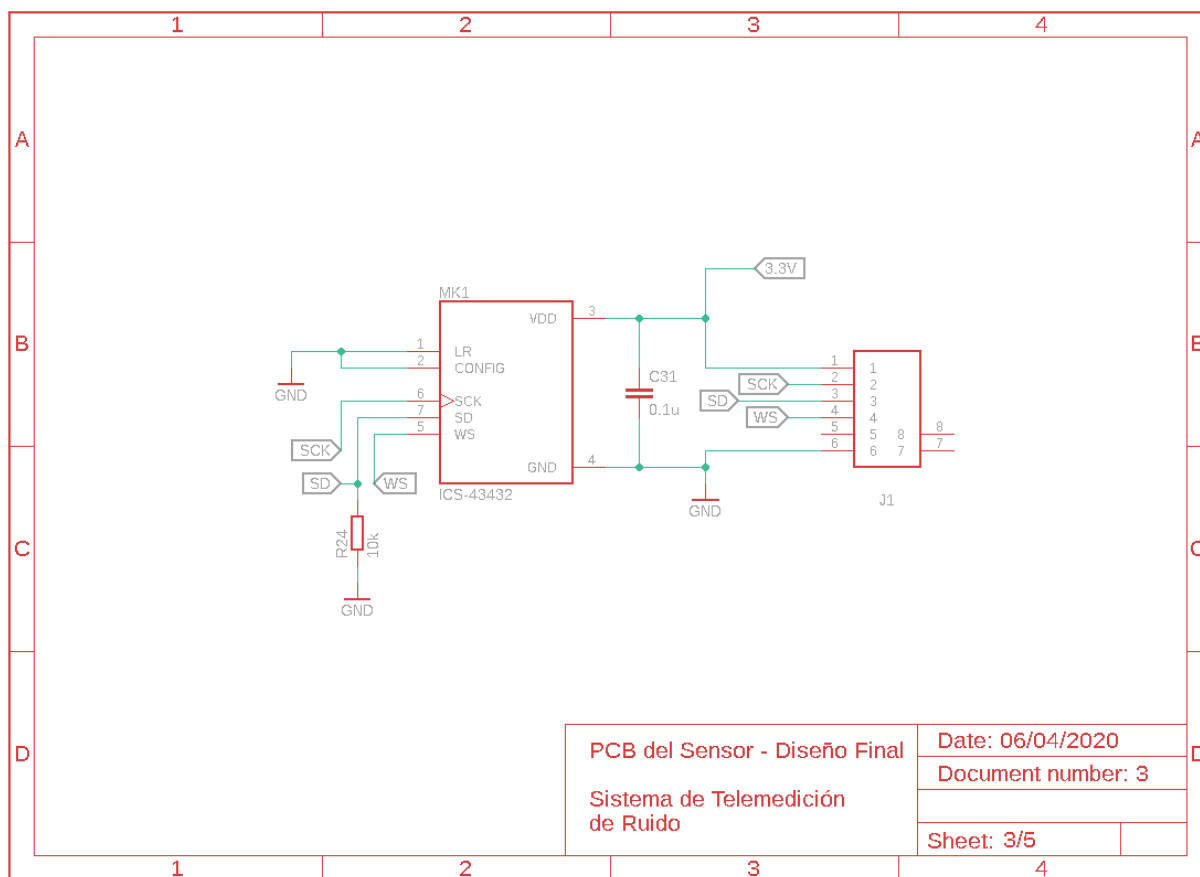
En el presente Anexo se incluyen los esquemáticos de las dos PCB que forman parte del sistema. En primer lugar, se presentan los diseños finales de la PCB principal del esta, correspondientes a dos hojas, la zona de control y la zona de potencia.

A continuación de estas dos imágenes, se muestra el esquemático correspondiente a la PCB del sensor.



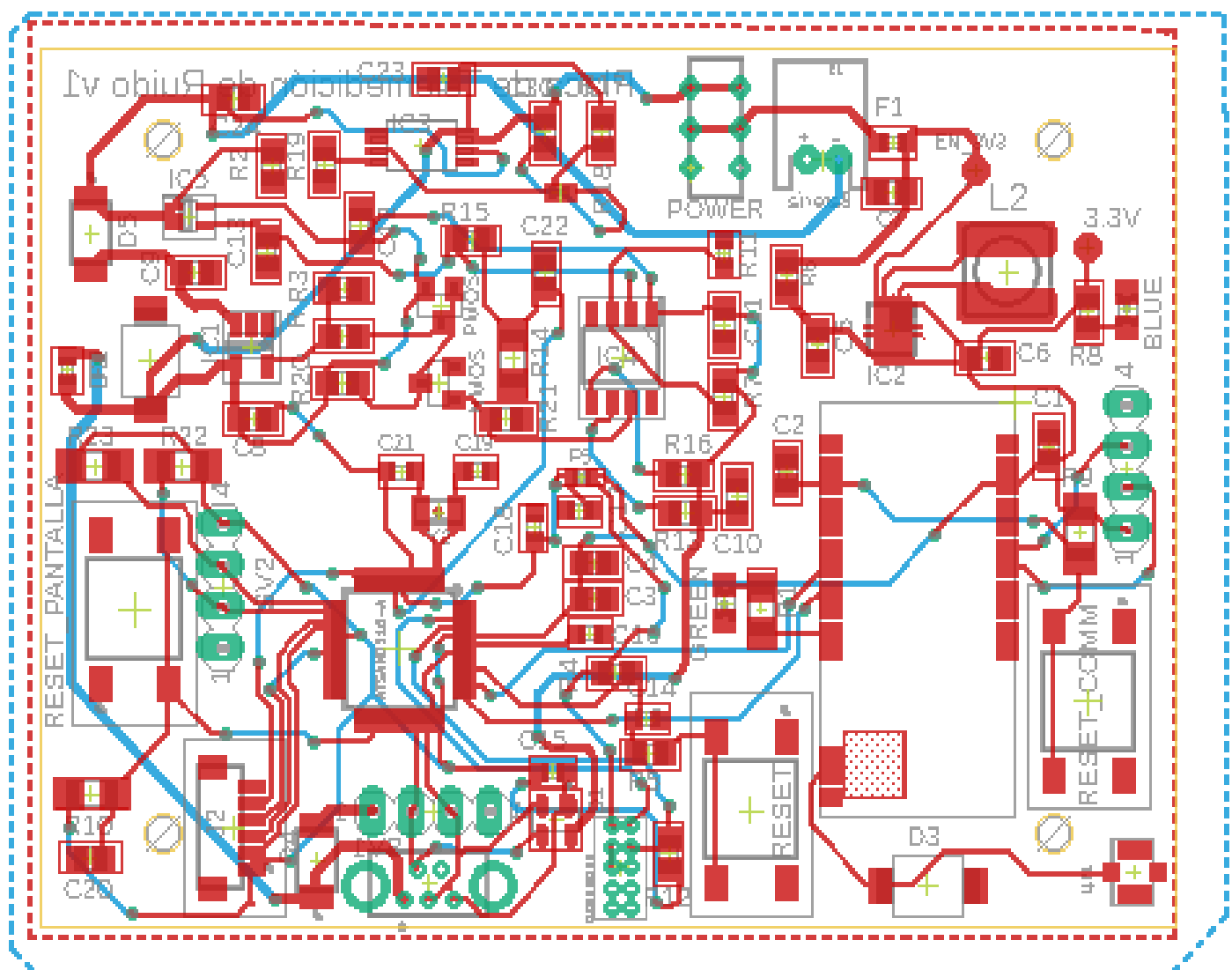


PCB Principal - Diseño Final	Date: 06/04/2020
	Document number: 2
	Etapas de potencia

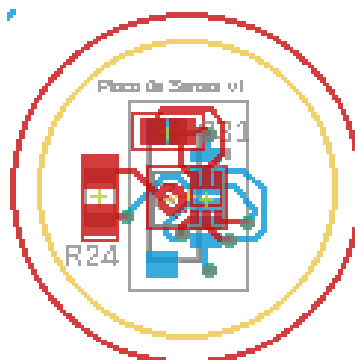


ANEXO C: Diseño Final de las PCBs del Sistema de Telemedición de Ruido Ambiente

En este caso, se van a mostrar los diseños finales sobre PCB de las dos partes que componen el sistema. En primer lugar, aparece la PCB principal en sus dos caras, para a continuación enseñar el diseño final de la placa donde estará el micrófono.



a)

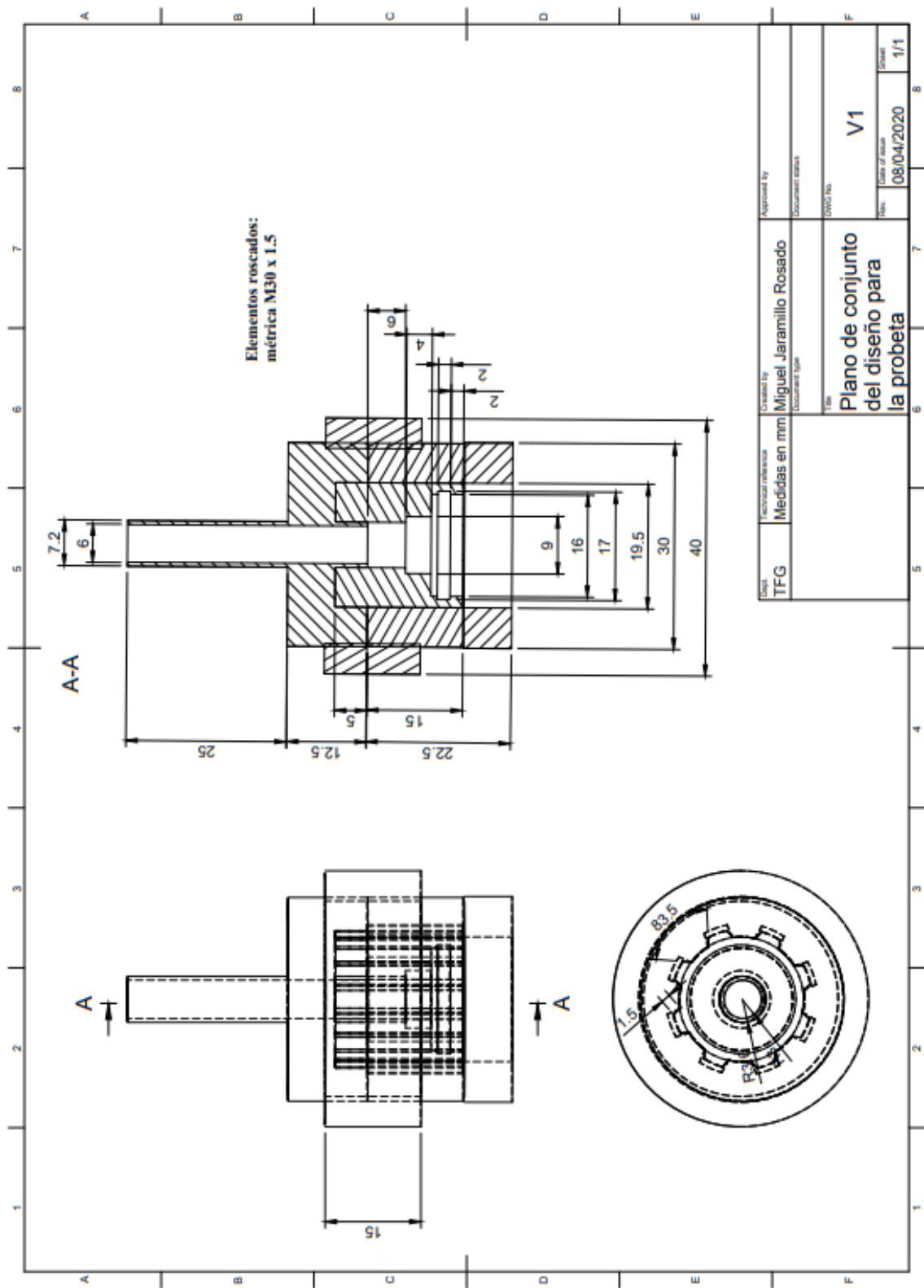


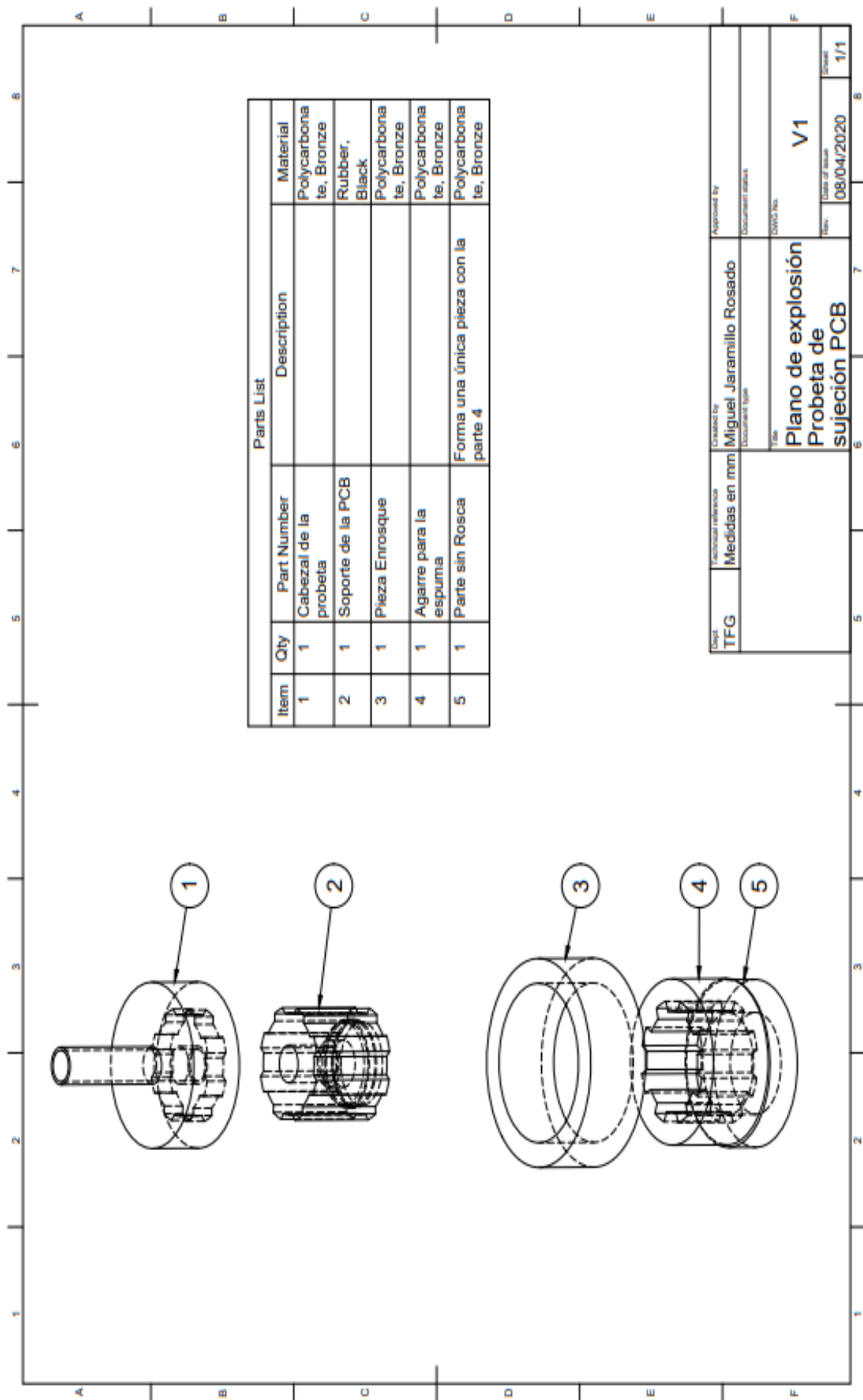
b)

Imagen 1. Boards de las placas del sistema. a) PCB Principal b) PCB del sensor

ANEXO D: Planos del sistema de telemedición de ruido

En este Anexo se presentan los diferentes planos de las piezas diseñadas para el sistema así como los planos del conjunto.





Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Cabezal de la probeta		Polycarbona te, Bronze
2	1	Soporte de la PCB		Rubber, Black
3	1	Pieza Enrosque		Polycarbona te, Bronze
4	1	Agarre para la espuma		Polycarbona te, Bronze
5	1	Parte sin Rosca	Forma una única pieza con la parte 4	Polycarbona te, Bronze

Dept TFG	Technical reference Medidas en mm	Created by Miguel Jaramillo Rosado	Approved by
		Document type	Document status
		File	DOC No.
		Plano de explosión Probeta de sujeción PCB	
			V1
		Rev.	Date of issue
			08/04/2020
			Sheet
			1/1

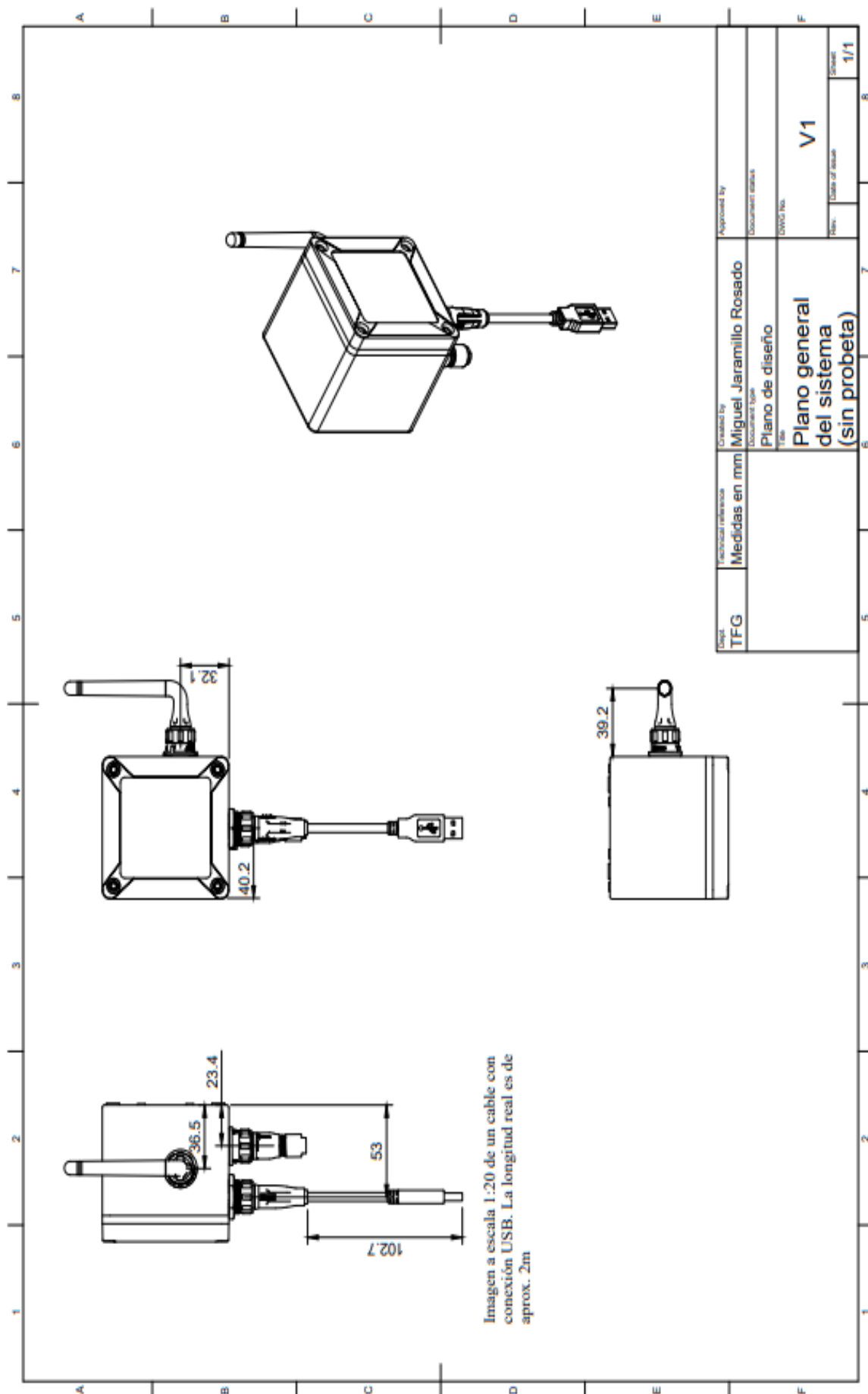
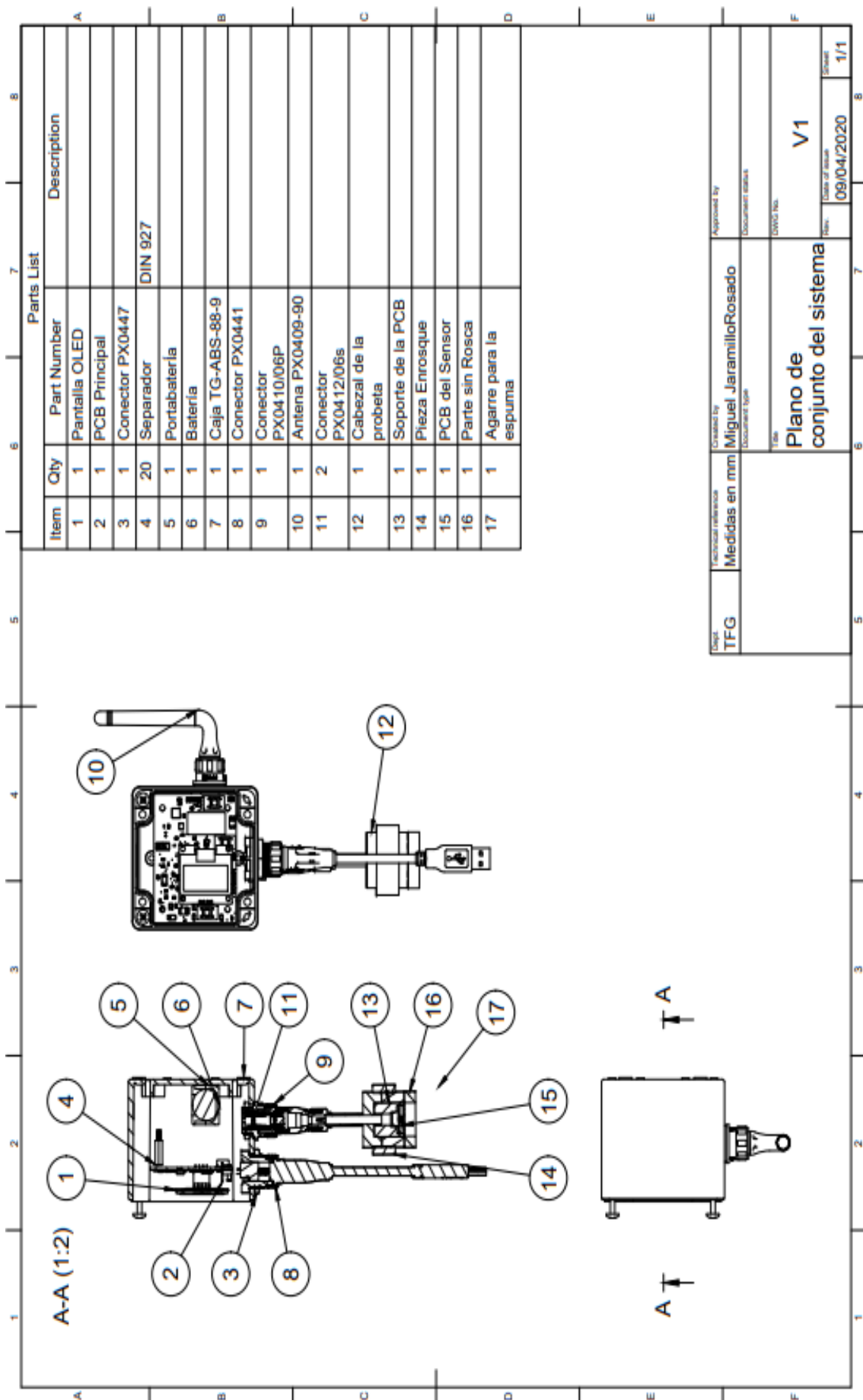


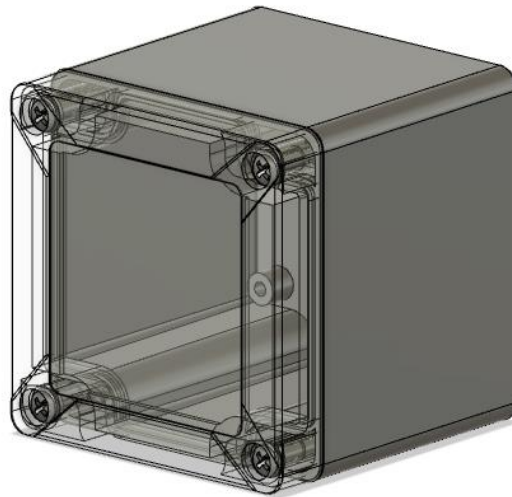
Imagen a escala 1:20 de un cable con conexión USB. La longitud real es de aprox. 2m



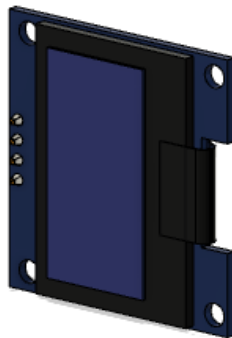
ANEXO E: Modelos 3D de las piezas del conjunto

A continuación, se muestra la lista de elementos que conforman el sistema junto a su modelo en 3D en Fusion360. Estos elementos se han representado en el plano de despiece en el apartado anterior. En este caso no se han incluido las PCBs ni los elementos que forman la probeta ya que ya se han mostrado con anterioridad en diferentes imágenes.

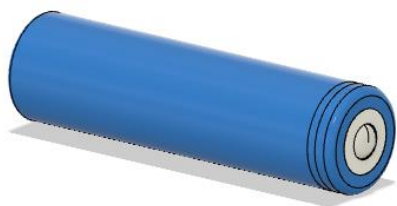
1. Lista de Piezas



a)



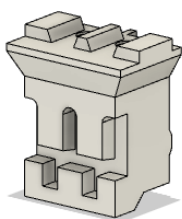
b)



c)



d)



e)



f)



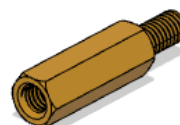
g)



h)



i)



j)



k)



l)

Imagen 1. Modelos en 3D de los componentes del sistema. a) Caja IP67 TG-ABS-88-9 b) Pantalla OLED HS1106 c) Batería 18650 PARIBADI 2800mAh d) Portabaterías e) Conector JST 2 Pines XHP-2 f) Conector JST 6 Pines SHR-06V-S g) Conector IP68PX0412 h) Conector IP68 PX0410 i) Conector IP68 PX0447 j) Separadores k) Conector PX0441 con USB l)Antena PX0409

2. Modelo completo del sistema en 3D

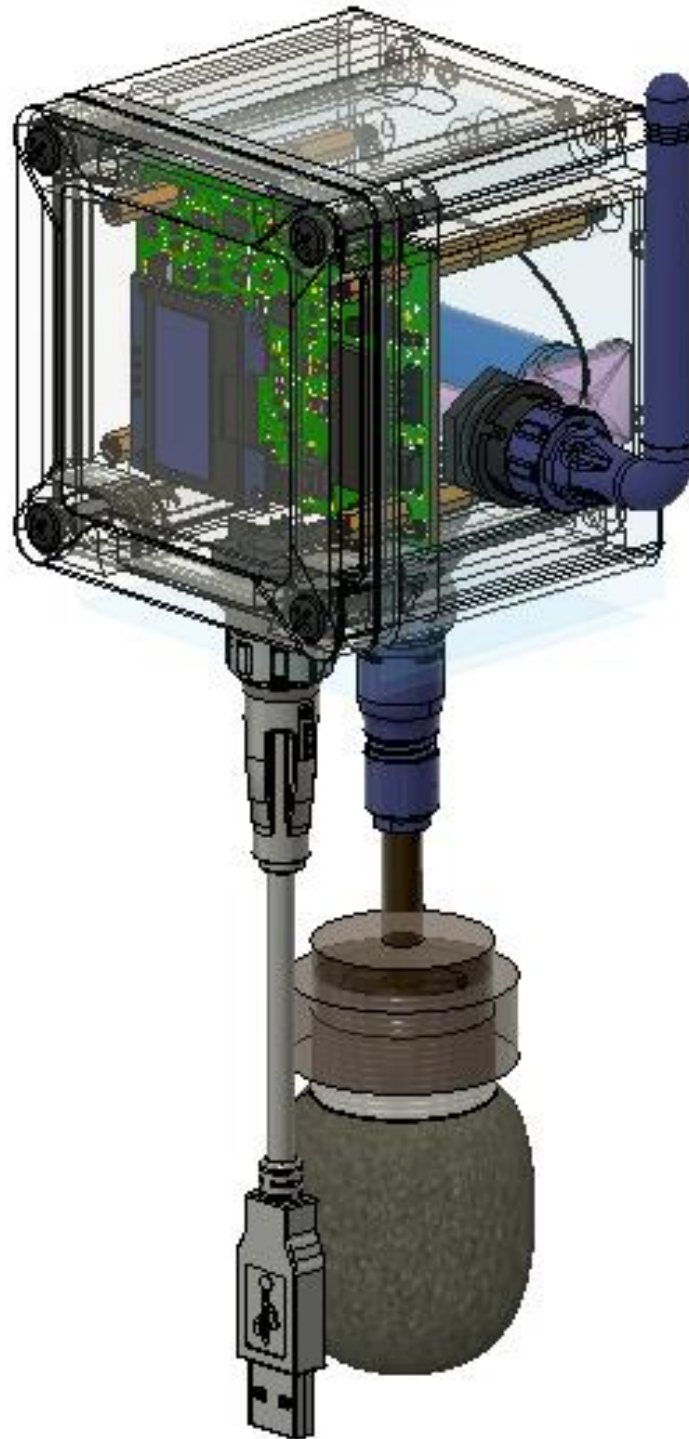


Imagen 2. Imagen completa del modelo 3D del sistema

Nota: la espuma antiviento no se trata de un modelo real. Es una representación para poder visualizar el equipo completo

Anexo F: Manual de fabricación y montaje del Dispositivo de Telemedición de Ruido Ambiente V2

INDICE

1. Pedido de PCB..... 2

2. Pedido de componentes. 3

3. Montaje de los componentes con el horno de soldadura. 4

4. Impresión de la probeta en 3D..... 5

5. Introducción del código. 6

6. Montaje en la carcasa. 9

Este manual tiene como propósito que cualquier usuario que quiera fabricar el dispositivo sepa cómo llevar a cabo el procedimiento de forma adecuada. Todos los documentos necesarios para la fabricación se adjuntan en el enlace descrito a continuación (<https://drive.google.com/drive/folders/1hmd6nB19U3FA-9V9fLMekgoqo-AzOsVC?usp=sharing>).

1.- Pedido de PCB.

Para realizar los pedidos de las PCBs hay que dirigirse a la web del fabricante JLCPCB (<https://jlcpcb.com/>). En dicha web hay que acceder al apartado *Quote Now* para configurar el pedido.

En primer lugar, es necesario subir los Gerber de las placas. Para cada una de ellas, se seleccionarán los siguientes parámetros una vez se hayan subido:

- PCB Quantity: 2
- PCB Thickness: 1.6
- PCB color: verde
- Surface finish: ENIG-RoHS
- Copper Weight: 1 oz
- Gold Fingers: No
- Panel by JLCPCB: No
- PCB color: verde
- Flying Probe Test: Fully Test
- Castellated Holes: No
- Different Design: 1
- Remove Order number: No

STENCIL

- Framework: No
- Dimensions: 380*280 mm
- Customized size: No
- Stencil Side: Top
- Stencil Quantity: 1
- Electropolishing: No
- Fiducials: No Fiducial

Una vez hecho esto, se añade al carrito de compra. Cuando se compruebe que todo está en orden, se accede a *Checkout Securely*.

En el menú que aparecerá, hay que introducir la dirección de envío del producto, la dirección de facturación, el método de envío y, por último, proceder al pago de las PCBs.

2. Pedido de componentes.

Para comprar los componentes necesarios para fabricar el sistema hay que tomar como referencia las Tablas 11 y 14 de la memoria. En ellas se encuentran las referencias de los fabricantes de los componentes, así como de los distribuidores disponibles para su compra. El método es el mismo para todos ellos. Tomando como referencia la lista de componentes de las PCBs, en primer lugar, hay que dirigirse a la web de *Mouser* (<https://www.mouser.es/>).

Una vez allí, hay que buscar los componentes y añadirlos al carrito de compra.

También se puede acceder directamente a ellos a través del siguiente enlace <https://www.mouser.es/ProjectManager/ProjectDetail.aspx?AccessID=69b22fdd4b>

Para realizar el pedido es recomendable hacerse una cuenta de usuario en *Mouser*. Una vez se haya completado este proceso, se accede a tramitar el pedido. Cuando se llegue a este punto, únicamente quedará rellenar los datos de facturación, elegir la dirección de envío y proceder al pago

3.- Montaje de los componentes con el horno de soldadura.

Una vez se disponga de las PCBs y de los componentes que forman parte de ella, es hora de realizar el montaje de las mismas. Para ello se necesitarán cuatro herramientas: pasta de soldadura, una espátula para soldadura, la Stencil y el horno.

En primer lugar, hay que fijar muy bien la Stencil en alguna superficie lisa y sin inclinación. Por ejemplo, en una mesa.

En segundo lugar, se coloca la PCB debajo de la Stencil procurando que coincida exactamente con los agujeros para los pads.

En tercer lugar, se coge pasta de soldadura y se coloca en los pads de la PCB. Se extiende con la espátula para que cubra perfectamente todos estos pads. Una vez esté listo, se han de colocar los componentes en su sitio sobre la PCB.

En cuarto lugar, hay que preparar el horno de soldadura.



Imagen 1. Interfaz del horno de soldadura

Para ello, hay que configurarla con la curva de calor apropiada. Esta dependerá de la pasta de soldadura elegida. Una vez iniciado el horno, hay que pulsar F3 para acceder a modificar la curva de carga. En este apartado aparecerán varios modelos precargados. Una vez esté listo, se pulsa el botón S para salir al menú principal y, finalmente, se pulsa F2 para iniciar el proceso.

4.- Impresión de la probeta en 3D.

Dentro de la carpeta adjuntada al inicio del manual se encuentra otra carpeta con los diferentes modelos 3D de las piezas diseñadas para la probeta. Los archivos .stl de cada uno de ellos se deben cargar en algún programa de edición 3D.

Después, es necesario conectar el PC con la impresora 3D que se vaya a utilizar. Dependiendo del modelo, la conexión puede ser vía cable, WI-FI o incluso Bluetooth.

Una vez se haya conectado correctamente, hay que iniciar el programa de edición 3D. En este caso, se usará *Meshmixer* como ejemplo, aunque el procedimiento es extrapolable a cualquiera.

Gracias a que los modelos ya están diseñados con las medidas reales, no necesitarán mucha edición. Es recomendable usar la función *Repair* para corregir algún error en el mallado hecho en la pieza.

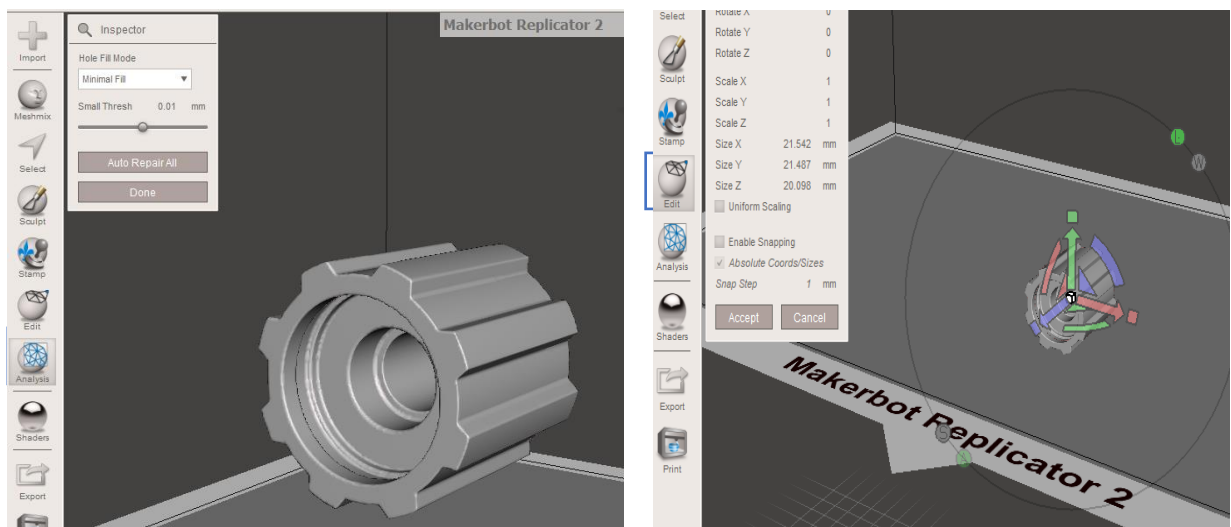


Imagen 2. Opciones importantes del programa MeshMixer

Esta opción se encuentra en el apartado *Analysis* → *Inspector* → *Auto Repair All*

Una vez realizado este proceso hay que colocar la pieza en la bandeja de la impresora. Para ello, se usará la opción *Transform* que se encuentra dentro de *Edit*.

Por último, se accederá al apartado *Print*. En este menú hay que definir la impresora que se va a utilizar, especificando su nombre, el software que utiliza y el formato de los archivos que se le van a enviar.

5.- Introducción del código.

Una vez que se tenga la PCB soldada y lista, es el momento de cargar el código en el microcontrolador. Para ello se precisa del código mostrado en el Anexo A (que se puede encontrar dentro de la carpeta compartida → Código_STRA) y el entorno de Arduino para compilar y cargar el código.

Lo primero que se necesita es cargar el bootloader al microcontrolador. Para ello se usará el JTAG, y un programa llamado Atmel Studio (descargable desde <https://www.microchip.com/mplab/avr-support/atmel-studio-7>). El bootloader es un archivo .bin que se encuentra en la carpeta adjunta.

Una vez se haya ejecutado Atmel Studio, hay que ir al apartado *Tools* → *Device Programming*. Aparecerá esta ventana:

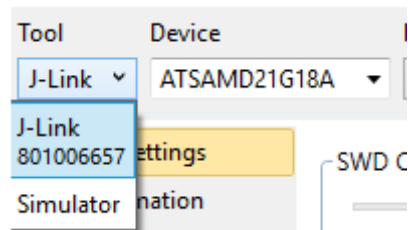


Imagen 3. Definir depurador y microcontrolador

Aquí hay que seleccionar el depurador y el microcontrolador. En *Interface* se elige SWD. Hay que asegurarse de que ambos estén conectados al PC. Hacer click en *Apply*. Si todo está bien, aparecerán unos dígitos en los recuadros *Device Signature* y *Target Voltage*.

A continuación, hay que borrar el fusible BOOTPROT para poder flashear el bootloader.

Para ello, se accede al apartado *Fuses* y se busca el nombre USER_WORD_0.NVMCTRL_BOOTPROT. Se define su dirección como 0x07. Hacer click en *Program*. Cuando se confirme que los fusibles se han borrado, hay que hacer click en *Verify*.

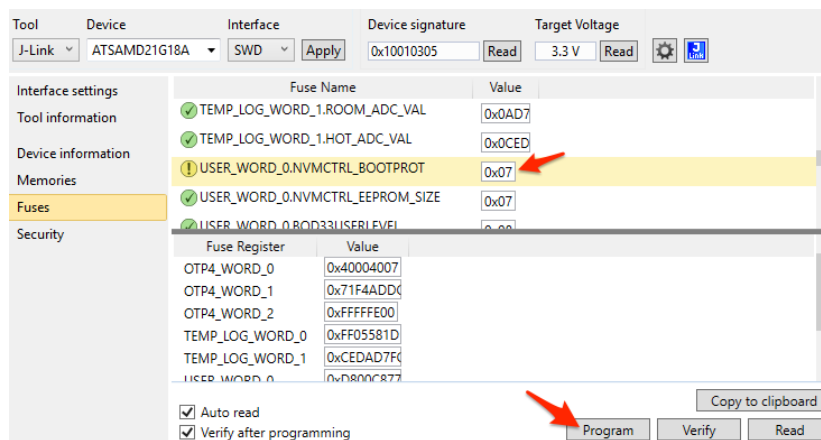


Imagen 4. Flash fusible

Una vez se haya hecho este paso, se accede al apartado *Memories*. En él, simplemente hay que acceder al explorador de archivos y seleccionar el archivo .bin mencionado al inicio. Pulsar sobre *Program*. Aparecerán unos mensajes:

Erasing Device...OK

Programming Flash...OK

Verifying Flash...OK

Por último, hay que volver a preparar el fusible BOOTPROT. Se accede al apartado *Fuses* y se escribe 0x02 en la dirección correspondiente. Por último, pinchar sobre *Program*.

De esta forma, ya se dispone de Bootloader en el microcontrolador. Esto permitirá usar el entorno Arduino para incluir el código conectando la PCB al PC únicamente con el cable USB.

Ahora, hay que acceder al entorno de programación y preparar el código. El IDE se encuentra en <https://www.arduino.cc/en/main/software>. Una vez se tenga listo, hay que iniciar la programación. Para ello:

En primer lugar, hay que revisar que la placa esté conectada a algún puerto serie COM del PC. El número del mismo puede variar, pero si es así aparecerá marcado con un punto. Se accede a esta opción yendo a *Herramientas* → *Puerto* → *COMx*

Una vez se compruebe este hecho, dentro del mismo apartado *Herramientas*, se accede a *Placas*, y se elige “Arduino MKRFOX1200”.

Posteriormente, hay que abrir el código en el IDE. Para ello, hay que dirigirse a la carpeta donde está el código, seleccionar *Main.ino* → *Abrir con* → *Arduino IDE*

En este momento hay que añadir los ficheros de las librerías que se van a utilizar. Concretamente, hay que añadir las correspondientes a: *I2S.h*, *RTCZero.h*, *Arduino.h*, *SPI.h*, *Wire.h*, *SigFox.h*, *Adafruit_GFX.h*, *Adafruit_SSD1306.h*.

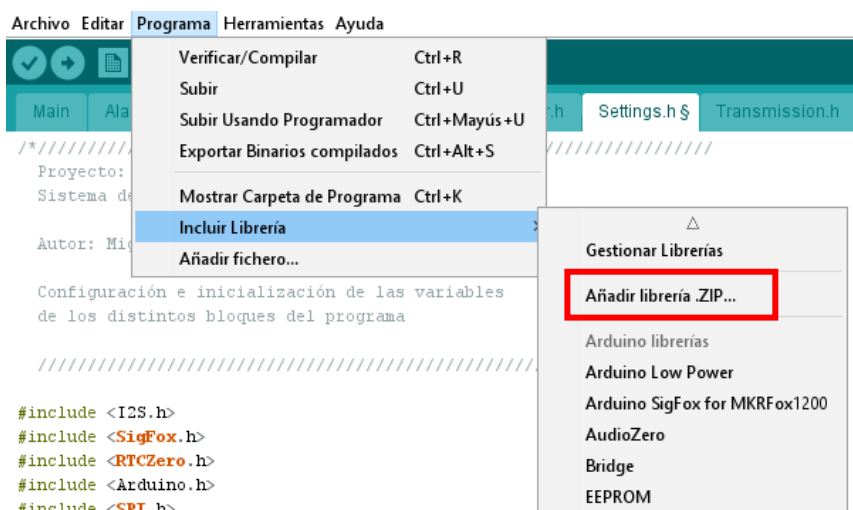


Imagen 5. IDE de Arduino

Las cinco primeras se pueden incluir desde el mismo IDE. Para ello, hay que dirigirse a la pestaña *Programa* → *Incluir librería* y buscarlas. En el caso de las tres últimas habría que volver a la misma pestaña y pulsar sobre *Añadir librería .ZIP*. y buscar la ubicación del archivo en el PC.

Una vez se hayan incluido estos archivos, únicamente quedaría pulsar sobre *Verificar* y *Subir*. De esta forma, ya estaría programado el microcontrolador del dispositivo.

6.- Montaje en la carcasa.

Una vez que las PCBs estén listas y se disponga de todo el material, es el momento de montar el dispositivo.

En primer lugar, hay que hacer los agujeros en los que irán alojados los conectores internos en la caja IP67. Las posiciones de los centros de estos agujeros se encuentran en la Imagen. El diámetro de los mismos es de 20mm. Se recomienda hacerlos con alguna herramienta tipo *Dremmel*.

Después, se insertan los conectores internos de la caja tal y como se puede ver en la siguiente imagen. En los tres casos, los conectores están formados por dos piezas: Una rosca y una tuerca. Primero, se inserta la rosca desde dentro de la caja y se fija con la tuerca desde fuera.

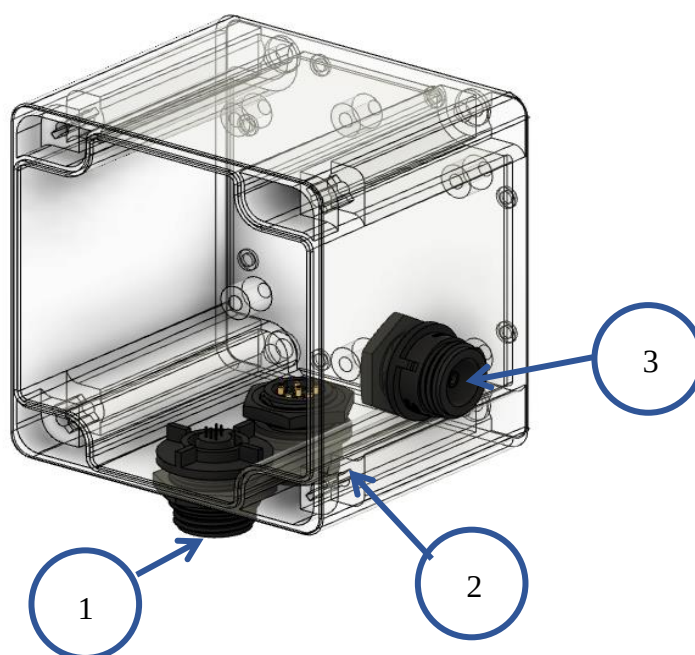


Imagen 6. Conectores Internos de la caja. 1) Conector PX0447 2) Conector PX0412 3) Conector PX0414

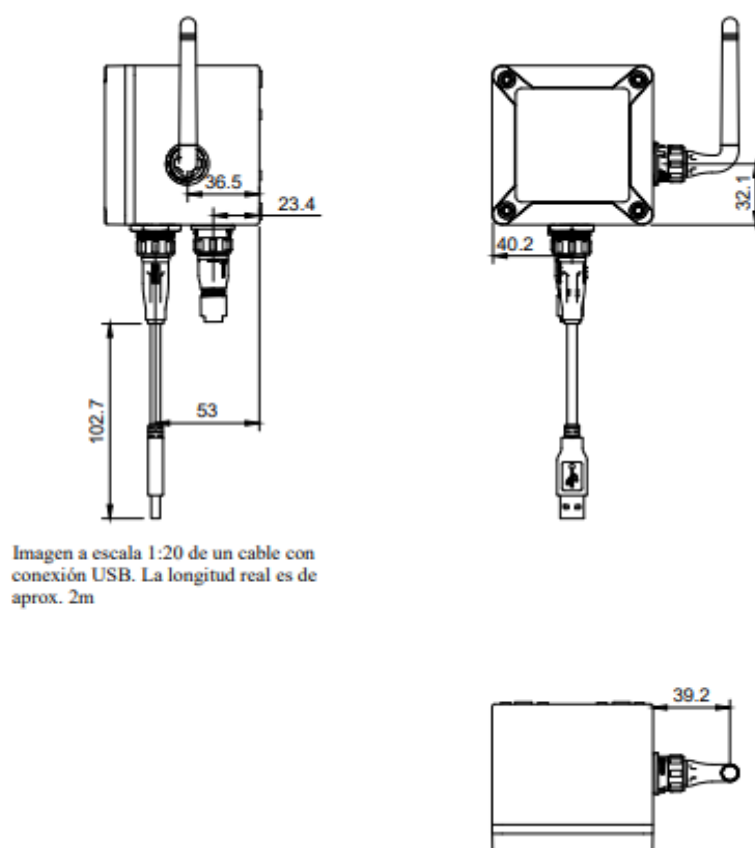


Imagen 7. Posiciones de los conectores en la caja

Una vez hecho este paso, hay que incluir los cables de conexión internos, así como los soportes. Puesto que la PCB tiene que quedar 40mm por encima de los agujeros de la base de la caja, hay que incluir dos soportes en cada esquina

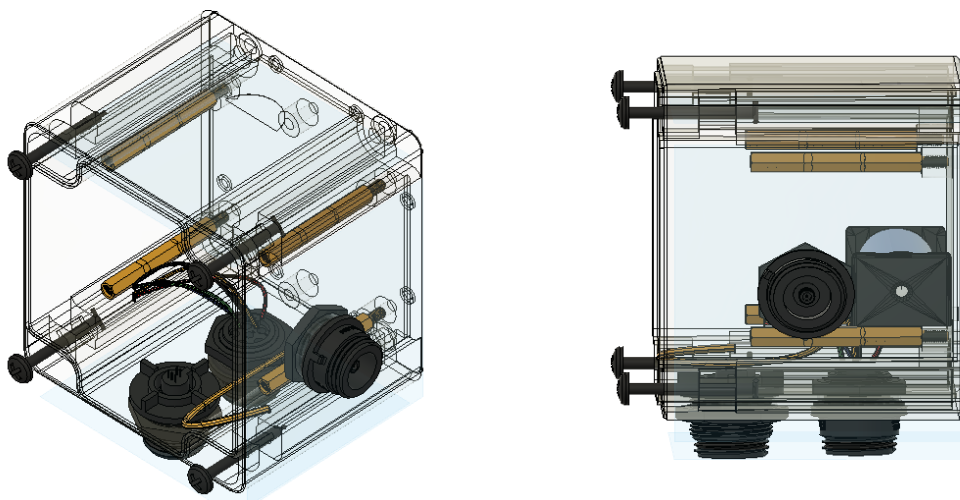


Imagen 8. Inclusión de cables, batería y soportes

Llegados a este punto, se incluye la batería con su porta-batería en la parte trasera de la caja, donde quedará apoyada en los soportes y en la base del conector PX0414.

A continuación, hay que incluir la PCB en la caja. Este proceso es el más delicado.

Lo primero que se va a realizar es conectar los cables internos a la PCB mediante sus conectores correspondientes: los cables de la probeta del sensor irán al puerto JST de 6 pines, los del USB al puerto USB, el cable de la antena va a su conector coaxial, y los cables de la batería van al puerto JST de dos pines. Cuando se haya conectado todo, se procede a introducir la PCB en la caja y colocar un separador en cada esquina para dejarla fija.

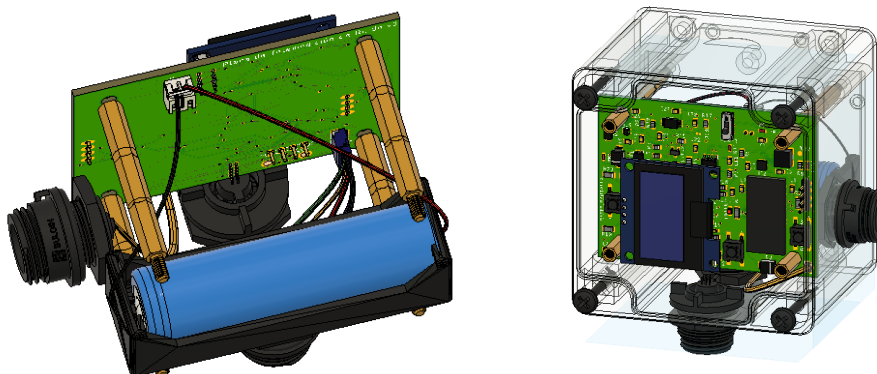


Imagen 9. Fijación de la PCB en la caja

El siguiente paso que se va a realizar es ensamblar los elementos externos. En primer lugar, se conectan la antena PX0409 y el cable USB PX0441 a sus conectores (PX0414 y PX0447, respectivamente). En ambos casos, lo primero es conectar la pareja de elementos, y después roscar la corona del conector externo sobre el interno para que quede totalmente fijo.

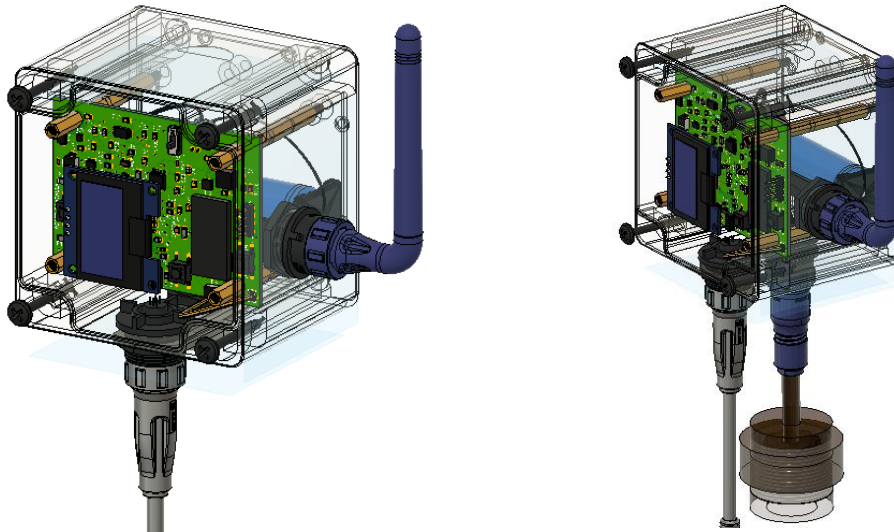
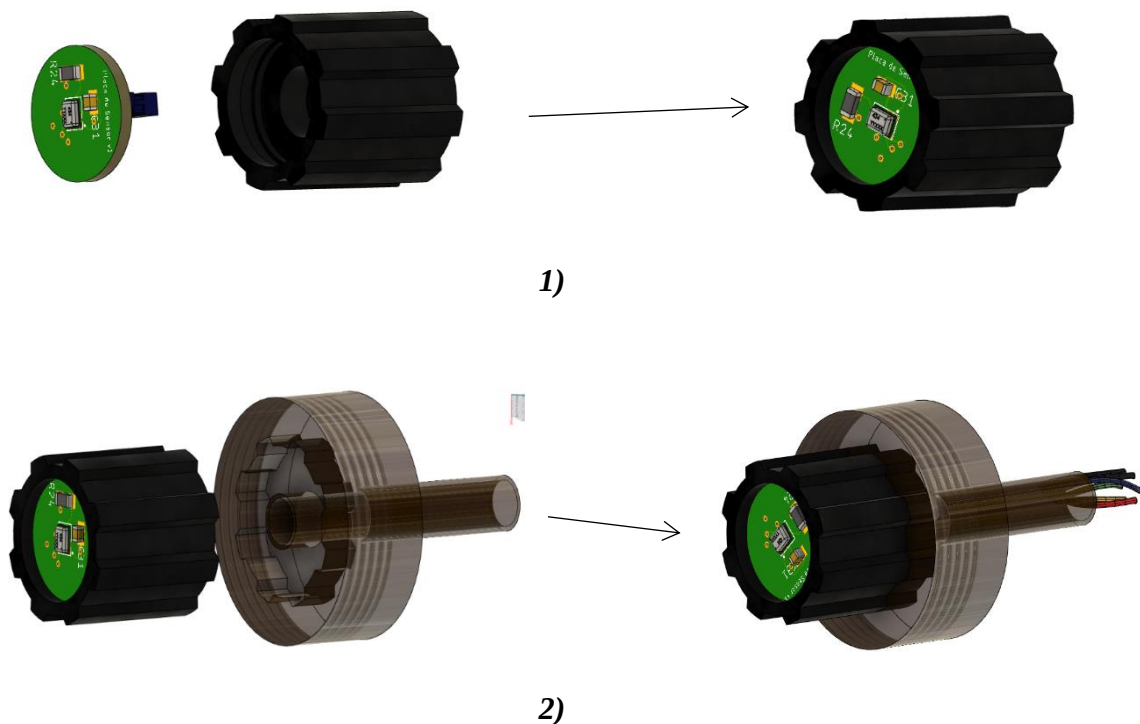


Imagen 10. Elementos externos conectados a la caja

Por otro lado, hay que fijar la probeta del sensor a la caja. El procedimiento para el ensamblaje es el siguiente:



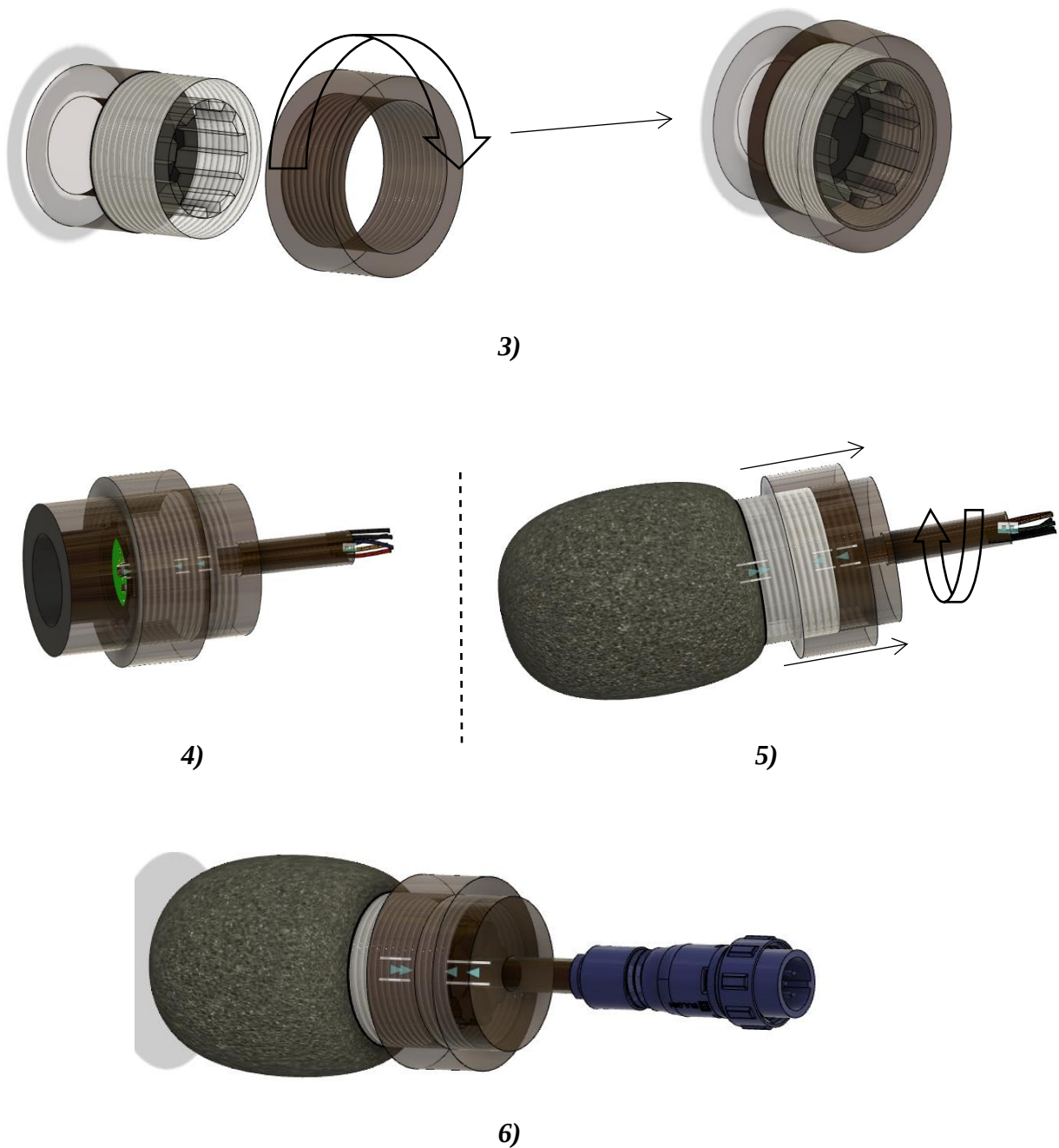


Imagen 11. Montaje de la probeta

En primer lugar, se introduce la PCB con el conector JST y los cables de conexión a través del soporte diseñado (Imagen 11.1). Una vez quede fijo en su alojamiento, se debe encajar el soporte con los cables en el hueco del cabezal, con la precaución de que vayan por el conducto destinado para ellos. (Imagen 11.2). A continuación, hay que roscar el anillo fijador en la zona roscada del cilindro de agarre (Imagen 11.3), para después unirlo al resto del conjunto ya ensamblado (Imagen 11.4). Por último, únicamente quedará roscar el anillo fijador hasta el tope del cabezal de la probeta (Imagen 11.5) y acoplar la espuma antiviento.

Una vez se tiene lista la probeta, hay que ensamblar el conector PX0410 con ella.



Imagen 12. Despiece conector PX0410

Este elemento se compone por cinco piezas. Estas son, del 1 al 5: la tuerca de ajuste, la pieza de unión, el perno, el cuerpo del conector, y la cabeza del conector. Esta última pieza es la que alberga los pines de conexión y la que se conecta al PX0412. Incorpora el anillo que bloquea el movimiento cuando se enrosca sobre el PX0412.

Para ensamblar el conector y la probeta, esta se introduce en primer lugar, a través de la tuerca, pasando por la unión y el perno. A continuación, se incorpora el cuerpo del conector y se rosca a la tuerca para fijar la probeta. En este punto, los cables de conexión del sensor (que van por el interior de la probeta), se pueden conectar a la cabeza del conector. De esta forma, las conexiones pueden fluir hasta el interior de la caja cuando la cabeza del PX0410 y el conector PX0412 se ensamblen.

Para finalizar el montaje del dispositivo, únicamente quedará cerrar la tapa de la caja y apretar los tornillos de sus esquinas. De esta forma, el sistema quedará totalmente hermético.

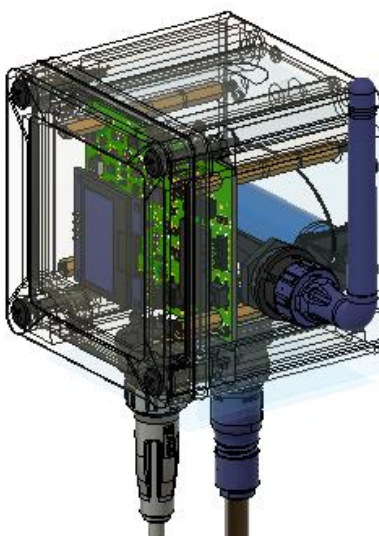


Imagen 13. Inclusión de la tapa de la caja y finalización del ensamblaje.

