

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE  
MADRID



# **DISEÑO DE LOS NODOS DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD AMBIENTAL EN LAS AULAS Y ESPACIOS DE LA ETSII-UPM**

Rodrigo Sendín Montero

Tutor: Yago Torroja Fungairiño

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

SEPTIEMBRE 2021



## RESUMEN

Este proyecto tiene el objetivo de crear una red de dispositivos que monitorizan la calidad ambiental y, así, poder gestionar adecuadamente los espacios en los que se encuentren desplegados. Los dispositivos se utilizan habitualmente en espacios domésticos o laborales para mejorar tanto la calidad del aire como el confort de las personas que los habitan. Para ello, utilizan sensores que miden contaminantes, el CO<sub>2</sub>, la cantidad de partículas, la temperatura, la humedad y más factores que afectan a la comodidad y a la salud.

Los dispositivos poseen una estructura común. Constan de una placa de circuito impreso (*PCB*) que integra los múltiples sensores, los módulos de comunicación (en caso de necesitarlos), el microprocesador, los diversos conectores, el *display* de visualización (también opcional) y una carcasa que protege las partes anteriores.

Existen varias formas de realizar la monitorización de los espacios. Se pueden realizar las mediciones de cada habitación individualmente con un dispositivo fijo que informe mediante un *display* como si fuese un termómetro o un despertador moderno, o se puede optar por un dispositivo portátil alimentado con baterías que pueda realizar las mediciones allá donde se lleve. Asimismo, es posible crear una red de dispositivos (nodos) que se instalen en varios espacios y que se conecten de forma inalámbrica a un servidor ( a través de una puerta de enlace, o *gateway*) desde el que se puedan monitorizar todos los espacios a la vez. Esta última es la opción escogida para este proyecto.

Los nodos sensores disponen de un módulo de comunicación y una antena de radiofrecuencia que se comunica mediante el protocolo *Zigbee* con el *gateway* que transmite la información al servidor. La red formada es una red tipo *mesh* en la que los nodos se pueden comunicar entre sí también, en la que se favorece el despliegue de un número elevado de nodos y que ofrece una cobertura más amplia que otros tipos de conexión inalámbrica como las redes *WiFi*.

En los nodos se han instalado sensores de CO<sub>2</sub>, partículas, temperatura, humedad relativa, luminosidad, ruido, gases volátiles y presencia. El objetivo era maximizar el número de variables a monitorizar para obtener la mayor cantidad de información posible y así poder realizar una gestión adecuada.

El microprocesador instalado ha sido el ATmega1280. Su función es la de recoger las señales de medición de los sensores y transformarlas en valores que se transmiten al servidor. Además, se ha incluido una memoria flash que sirve para almacenar el firmware instalado y, así, poder disponer de un back-up a la hora de realizar actualizaciones de forma inalámbrica.

En cuanto a la alimentación de los nodos sensores, se estudió la utilización de baterías, la alimentación por cable *USB*, la instalación de conectores de corriente con transformador o el diseño de un circuito de alimentación que transforma la corriente alterna del suministro doméstico a corriente continua con los voltajes requeridos por cada componente. Finalmente se ha incluido la última opción combinada con un conector *USB* para tener una conexión alternativa.

En la fecha de comienzo del trabajo ya se contaba con un prototipo operativo y testeado. Este prototipo, aunque era funcional, contaba con algunos inconvenientes. El inconveniente principal era el propio tamaño del prototipo, que era demasiado grande para lo que se deseaba. Otros inconvenientes venían dados por los sensores, ya que algunos no realizaban las mediciones adecuadamente o se contaba con sensores repetidos para una misma variable (permitían compara cuál de los dos realizaba mejor la medición). También era necesario sustituir algunos componentes por otros con mejor rendimiento y/o precios más económicos. Por último, algunos de los documentos del diseño del primer prototipo presentaban un aspecto mejorable en su formato. Por todas estas razones se decidió diseñar un nuevo prototipo.

En el proceso de diseño el primer paso fue la selección de los componentes a incluir en el nuevo nodo. Los componentes que primero se eligieron son los que marcan la funcionalidad del nodo, en este caso, los sensores de medición. Los criterios de selección utilizados fueron de usabilidad y económicos, ya que están destinados a producir un prototipo funcional que permita realizar un despliegue en las aulas de la *ETSII*. Posteriormente, comenzó el diseño de la nueva placa con el desarrollo de los primeros esquemas eléctricos de los circuitos que integraría.

Para diseñar una *PCB*, que es la tarea principal de este Trabajo de Fin de Grado, se requería un software de diseño de *PCBs*. El elegido fue el software de diseño profesional *Altium Designer*. Este software permite incorporar los componentes del nodo sensor, diseñar los circuitos esquemáticos y realizar el diseño de la placa con todas las conexiones en ella de forma que se obtengan como resultado los documentos necesarios para encargar su fabricación.

El proceso de diseño de la PCB en Altium comenzó con la creación de las versiones virtuales de los componentes reales (símbolos y huellas). A veces, estos componentes ya se encuentran disponibles en bibliotecas del propio programa en forma de recursos, pero es habitual que el diseñador sea el encargado de crear estos componentes él mismo. A continuación, se diseñaron los documentos esquemáticos en los que se establecieron las conexiones entre pines y donde se asignaron las señales electrónicas. Posteriormente, se establecieron la forma y las dimensiones físicas de la placa para que encajase en la carcasa. Finalmente se colocaron los componentes en la superficie de la placa (*layout*) y se crearon las conexiones, una a una, de cada pin en un proceso conocido como *routing*.

El producto final fue una placa sobre la que se debían soldar los componentes, ya fuese manualmente, en un horno de soldadura o en un centro automatizado de soldadura. Tras la soldadura de los componentes, la placa estaría lista para ser testeada antes de su instalación y despliegue.

Finalmente, la placa no ha podido ser debidamente testeada y desplegada debido a una serie de circunstancias relacionadas con la dificultad administrativa para realizar los pedidos de los componentes y, en menor medida, con la pandemia COVID-19. No obstante, la elaboración del prototipo ha permitido obtener más información en diferentes áreas del proceso de elaboración de este. Dicha información ha sido recogida en este documento de forma que facilite el posterior trabajo en el proyecto. Asimismo, algunas de las decisiones tomadas durante la elaboración del trabajo, como la satisfactoria integración de la PCB en la carcasa, constituyen pasos hacia adelante en la dirección hacia un diseño final.

La memoria recoge detalladamente paso a paso, tal y como se ha descrito en este resumen, el desarrollo de la segunda versión del prototipo, justificando cada decisión de diseño tomada y aportando información sobre cada fase del proceso.



# TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>1.1. Presentación</b> .....	11
<b>1.2. Estado del arte</b> .....	11
<b>1.3. Justificación</b> .....	13
<b>1.4. Antecedentes</b> .....	15
<b>1.5. Objetivos</b> .....	17
<b>1.6. Metodología</b> .....	18
<b>1.7. Estructura del documento</b> .....	19
<b>2. DISEÑO DEL PROTOTIPO</b> .....	20
<b>2.1. Selección de componentes</b> .....	20
<b>2.1.1. Criterios de búsqueda</b> .....	20
<b>2.1.2. Sensores seleccionados</b> .....	22
<b>2.1.2.1. Sensor de partículas</b> .....	22
<b>2.1.2.2. Sensor de calidad del aire y gases volátiles</b> .....	23
<b>2.1.2.3. Sensores de CO2, humedad y temperatura</b> .....	23
<b>2.1.2.4. Sensor de presencia</b> .....	26
<b>2.1.2.5. Sensor de ruido ambiental</b> .....	27
<b>2.1.2.6. Sensor de luz ambiental</b> .....	28
<b>2.1.3. Componentes de comunicación seleccionados</b> .....	29
<b>2.1.3.1. Microprocesador</b> .....	29
<b>2.1.3.2. Módulo FTDI</b> .....	30
<b>2.1.3.3. Memoria Flash</b> .....	30
<b>2.1.3.4. Módulo de comunicación</b> .....	31
<b>2.1.4. Componentes de alimentación seleccionados</b> .....	32

2.1.4.1.	Regulador de alterna.....	32
2.1.4.2.	Convertidor reductor .....	32
2.1.4.3.	Convertidor elevador .....	33
2.1.4.4.	Interruptores.....	33
2.1.5.	Componentes adicionales seleccionados.....	33
2.1.5.1.	Led RGB .....	33
2.1.5.2.	Tubo de luz .....	34
2.1.5.3.	Conector Micro <i>USB</i> .....	34
2.1.5.4.	Botón de RESET .....	35
2.2.	Diseño esquemático del circuito .....	36
2.2.1.	Símbolos.....	37
2.2.2.	Esquemáticos del prototipo .....	38
2.2.2.1.	Sensores .....	38
2.2.2.2.	Alimentación .....	39
2.2.2.3.	Comunicación.....	40
2.2.2.4.	Componentes adicionales.....	42
2.3.	Bibliotecas de componentes de la PCB .....	43
2.3.1.	Descripción.....	43
2.3.2.	<i>Supplier Link</i> .....	44
2.4.	Carcasa.....	45
2.4.1.	Requisitos .....	45
2.4.2.	Modelo seleccionado .....	45
2.4.3.	Modelos adicionales.....	46
2.5.	<i>Layout</i> .....	47
2.6.	Reglas de diseño.....	50
2.6.1.	Descripción.....	50

2.6.2. Reglas del prototipo .....	51
2.7. <i>Routing</i> .....	52
2.7.1. Definición.....	52
2.7.2. Recomendaciones .....	54
2.8. <i>Design rule check</i> .....	56
2.9. Pasos finales .....	57
2.9.1. Fabricación de la placa y solicitud de componentes .....	57
2.9.2. Soldadura y testeo .....	59
3. RESULTADOS.....	60
3.1. Primera versión .....	60
3.2. Segunda versión .....	61
3.3. Futuras versiones .....	63
4. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO .....	65
4.1. Estructura de descomposición del proyecto (EDP).....	65
4.2. Diagrama de Gantt.....	66
4.3. Presupuesto .....	67
5. CONCLUSIONES .....	69
6. ANEXOS .....	70
7. ÍNDICE DE FIGURAS.....	83
8. ÍNDICE DE TÉRMINOS.....	85
9. BIBLIOGRAFÍA .....	88



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Presentación

Desde hace un tiempo, la necesidad de mejorar la calidad del ambiente en espacios cerrados ha ido creciendo. No es un problema nuevo, ya que se han desarrollado infinidad de aparatos que contribuyen a este fin. Sin embargo, la tendencia a tener que pasar cada vez más tiempo realizando tareas en interiores ha incrementado notablemente esta necesidad, más aún, tras una pandemia que ha puesto de manifiesto la conveniencia de disponer de una buena ventilación y, en general, de una buena gestión de los espacios.

Cada parámetro como la humedad, la temperatura o el nivel de  $CO_2$  puede regularse de una forma diferente y más o menos compleja. No obstante, primero se debe realizar una monitorización adecuada para luego saber en qué hay que actuar y cuánto hay que hacerlo.

## 1.2. Estado del arte

Este proyecto se enmarca en el sector de los dispositivos de monitorización de la contaminación en el hogar y en la oficina. El cometido de estos es informar sobre las condiciones ambientales y sobre los picos en las mediciones de forma que se pueda decidir si se han de tomar acciones o no.

El sector tiene su punto de partida en la década de los setenta en Estados Unidos. La razón primaria fue la proliferación de diversos estudios sobre la contaminación ambiental y sus efectos en la salud. Además, las nuevas regulaciones al respecto y los nuevos estándares en polución, aunque centradas más bien en la contaminación industrial y municipal, también han contribuido en el crecimiento de este mercado. Por otra parte, recientemente se han dado otros fenómenos que han potenciado aún más la demanda, como la pandemia COVID-19 y el confinamiento masivo que conllevó, o el cambio climático y sus efectos, por ejemplo, en la generación estacional de polen (la cual ha aumentado un 20%, empieza antes y dura más) (Wilde, 2021).

Las empresas han ofrecido soluciones para la monitorización ambiental doméstica con productos que, aunque tienen muchos puntos en común, presentan enfoques muy diferentes. Los puntos en común se encuentran en las variables a medir. Estas, normalmente, son las que conforman el *AQI* (Índice de calidad del aire) y que son: el nivel de ozono, la contaminación de partículas *PM2.5* y *PM10*, el  $CO_2$ , el  $SO_2$  y el  $NO_2$ . Los valores de estas variables se combinan dando lugar a un valor situado entre el 0 y 500 y de esa forma indican la calidad del aire. No obstante, un gran número de

dispositivos realizan las mediciones de las diferentes variables sin combinar, presentando así los valores individualmente para aportar una mayor información.

En cuanto a las diferencias entre dispositivos, estas radican en la conectividad, en la cantidad de variables que miden, en la precisión, en la forma de mostrar los datos, en su forma de despliegue y, por supuesto, en el precio. Con respecto a este último factor, los precios oscilan entre los 90€ y los 200€ en los modelos domésticos más conocidos (Wilde, 2021).

Las variables a monitorizar básicas que suelen implementar todos los dispositivos son las del *AQI* (Temtop, s.f.) y otras habituales como la humedad, la temperatura y la presión del aire. Algunas empresas van más allá y ofrecen monitores para requerimientos más específicos que permiten detectar gases orgánicos comunes *VOCs* como la acetona, el metanol, el benceno, el etanol, el tolueno y el formaldehído. También los hay que permiten medir gases nocivos como el radón, gas que ha sido clasificado como una de las mayores causas de cáncer de pulmón en no fumadores. Por último, las empresas desarrolladoras han querido también mejorar el confort de los clientes. Esto ha dado como resultado una gama de productos que también monitorizan el ruido y la luminosidad.

A la hora de desplegar los dispositivos en los espacios, las diferencias se hallan principalmente en si el dispositivo es portátil o no. Los que forman parte de la primera opción permiten desplazarlos de un espacio a otro para realizar las mediciones, pero poseen la desventaja de necesitar baterías y sólo se limitan a mostrar los datos en pantalla o en una app (si el dispositivo es muy pequeño y/o es de bolsillo). Por otro lado, encontramos a los monitores fijos, los cuales ofrecen distintas formas de alimentación: *USB*, cable *Ethernet* (PoE) o directamente a través de la red eléctrica (Awair, s.f.). Las ventajas que ofrecen los monitores fijos en general son: un mayor número de variables, una mayor conectividad y la posibilidad de montar una red de nodos en diferentes espacios monitorizados desde un mismo servidor.

La conectividad es el aspecto que más difiere entre dispositivos. La mayoría de los modelos disponen de conexión vía *Bluetooth*, pero los más modernos pueden conectarse mediante *WiFi*, un *router gateway*, cable *Ethernet* o redes *LAN* privadas. Algunos tienen la opción de conectarse a *Alexa* y *Google Assistant*, e incluso pueden ser programados fácilmente mediante protocolos *IFTTT* (If this, then that) (Airthings, s.f.) para realizar labores de domótica además de monitorización.

Finalmente, la última diferencia destacable se encuentra en el display de la información en cada modelo. Los más sencillos utilizan leds con códigos de colores y parpadeos para transmitir la información, mientras que los “*Smart-Monitors*” más avanzados disponen de pantallas en el propio dispositivo o transmiten la información a una app o a un servidor que muestra todo por pantalla.

### 1.3. Justificación

La finalidad de este proyecto es dar una solución al problema de monitorización para poder gestionar de forma adecuada y óptima la calidad ambiental en espacios cerrados y con una ocupación alta como puedan ser las aulas de la *ETSII*. Además, se pretende ampliar el rango de parámetros medibles al máximo posible con un solo dispositivo, ya que, habitualmente, los dispositivos que se encuentran en el mercado solamente miden un par de variables.

Actualmente, se han desplegado ya cinco prototipos de sensores inalámbricos con los que se ha hecho una primera prueba de la integración del sistema conjunto (nodos, *gateways* y servidor). Las mediciones se monitorizan en un servidor de la plataforma *Grafana* en el que se muestran diversas gráficas de los valores en un instante determinado o en un intervalo de tiempo de los parámetros en cuestión.

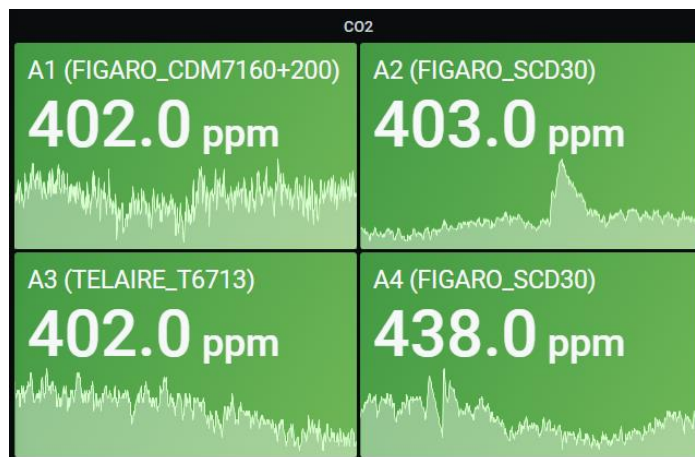


Figura 1. Niveles de CO2 en aulas de la ETSII

En la figura 1, se puede apreciar el valor del nivel de CO2 en las distintas aulas medido en ppm. Por otro lado, en la figura 2 y en la figura 3 se muestran, respectivamente, un intervalo de tiempo con los valores del sensor de partículas y otro intervalo con las indicaciones de la activación del sensor de presencia.

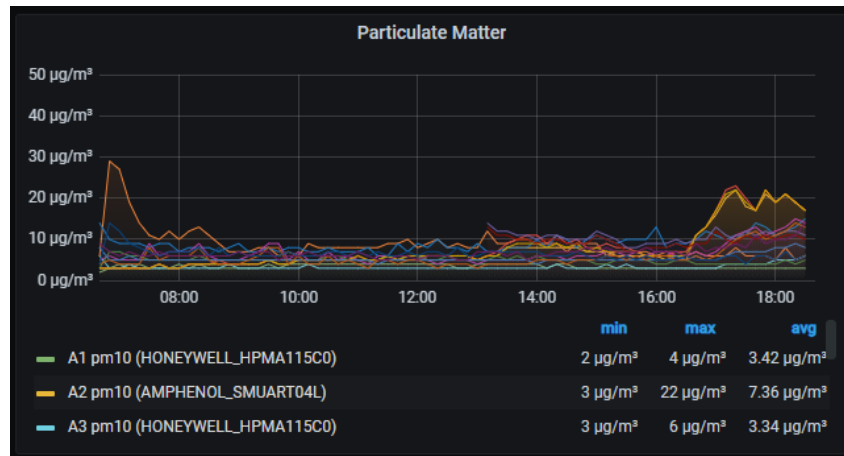


Figura 2. Concentración de partículas

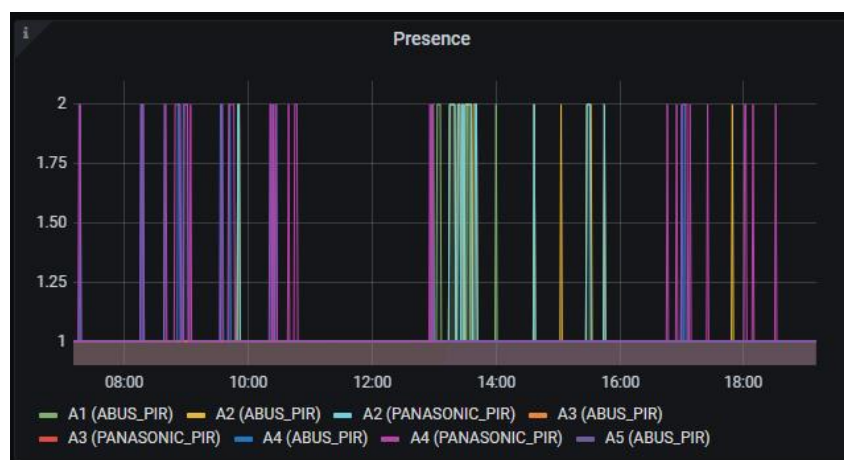


Figura 3. Detecciones del sensor de presencia

Existen diversos protocolos de comunicación inalámbricos, como el *WiFi* y el *Bluetooth*. La elección del protocolo viene dada por las características de la red de comunicación que se va a implementar. La proximidad entre dispositivos o el volumen de datos a transmitir son un ejemplo de estas.

El protocolo de comunicación utilizado en este proyecto es el *Zigbee*. Este sistema está especialmente diseñado para aplicaciones de domótica e *IoT* y utiliza un esquema de red tipo *mesh*. Se caracteriza por el hecho de que los dispositivos que lo utilizan no necesitan estar cada uno conectados a la red *WiFi*, sino que estos dispositivos están comunicados entre sí actuando como repetidores de señal. Para conectar el sistema a internet se dispone de un único punto de acceso llamado *gateway*, permitiendo compartir dicha conexión con el resto de los nodos. Esto es algo muy beneficioso cuando se quiere establecer una red extensa con un elevado número de nodos.

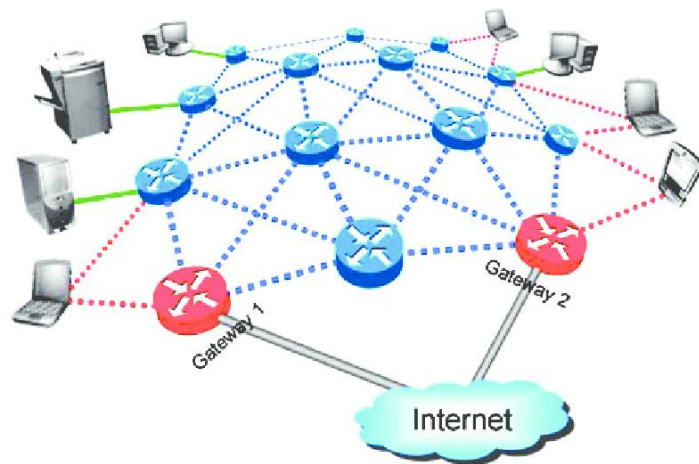


Figura 4. Esquema de red tipo Mesh (Lozano-Garzon, 2011)

El objetivo del *TFG* es el diseño de un nuevo hardware de los nodos sensores para poder realizar un despliegue mayor, apuntando a todas las aulas de la escuela, y con un diseño que responda a criterios de coste y usabilidad.

El enfoque estará en la producción y puesta en servicio, por lo que se incluirán: una carcasa, un sistema de alimentación adecuado para su instalación en las aulas, un microprocesador más eficiente y una selección final de sensores basada en la calidad de medición de estos y en su coste.

#### 1.4. Antecedentes

En el comienzo de este *TFG* el proyecto se encontraba en una fase de pruebas y testeo de sensores. El diseño del prototipo anterior permitía comprobar la medición de los sensores y la comunicación entre los nodos y el *gateway*. Su diseño estaba pensado para realizar pruebas cómodamente.

La placa del prototipo tenía unas dimensiones demasiado grandes (190mm x 190mm) como para poder ser desplegada como diseño final, suponiendo un gran obstáculo a la hora de buscar una caja para el nodo. Además, el propio diseño de la placa admitía mejoras tanto en la organización de los documentos de diseño como en el propio enrutamiento de las conexiones de los componentes.

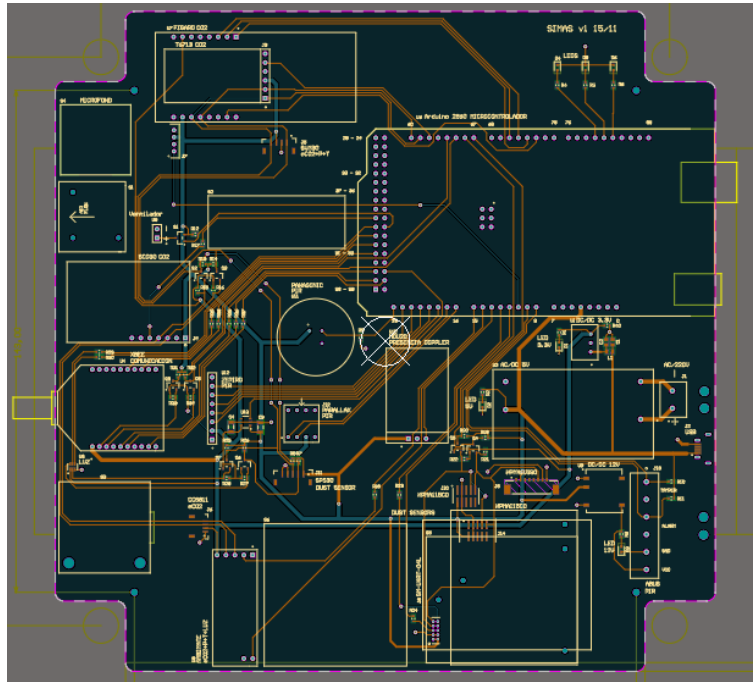


Figura 5. Primer prototipo

En la fase de testeo de los componentes del primer prototipo se pudo comprobar que algunos sensores no realizaban las medidas bien, o, al menos, con la misma calidad que otros sensores con la misma función; por tanto, se decidió la sustitución de dichos sensores en futuros diseños.

En cuanto al software, se había desarrollado un firmware para el *Arduino* que posteriormente se podría trasladar a un microprocesador de la marca *Microchip* con la herramienta de importación del entorno de desarrollo *Atmel Studio*.

### 1.5. Objetivos

El *TFG* tiene como objetivo principal la elaboración de un nuevo hardware para los nodos sensores enfocado a una versión final para su despliegue en la escuela.

Partiendo del objetivo principal se puede hacer un desglose de pequeños objetivos presentados al comienzo del trabajo.

- Integrar la *PCB* en una carcasa de forma que los sensores quedasen protegidos, y el diseño resultase más agradable a la vista en su instalación en las aulas.
- Sustituir el microprocesador de *Arduino* por un microprocesador de la familia *ATmega*, cuyo firmware sería más o menos compatible y de fácil inclusión.
- Valorar las diferentes soluciones para la alimentación del nodo sensor (utilización de baterías o alimentación desde la red).
- Desarrollo de un circuito de medición *SPL* (Sound Pressure Level) propio en lugar de la compra de un sensor acústico.
- Estudiar la implementación de nuevos sensores adicionales a los del prototipo anterior.
- Estudiar la viabilidad para la sustitución del *ATmega1280* por un microprocesador de la nueva generación de micros de *AVR*, los *AVR128DB*.
- Instalar una memoria flash para la realización de actualizaciones *OTA*.

Cada decisión del proyecto debe estar contrastada y revisada, ya que un pequeño error puede desencadenar en un fallo total del prototipo y en el consecuente gasto económico. Disponer de informes previos, notas o cualquier información que permita anticipar el resultado de una nueva decisión es de gran ayuda. Por estos motivos, queda establecido que la elaboración de una memoria, que recoja todo el desarrollo del proyecto a modo de guía, sea también un objetivo fundamental del trabajo.

### 1.6. Metodología

En el desarrollo del proyecto se pueden diferenciar varias fases en las que las tareas y los objetivos han variado enormemente. Estas fases se pueden resumir en cuatro etapas que se desglosan de la siguiente forma.

Una primera fase de aprendizaje con el programa *Altium Designer*, y de familiarización con el prototipo anterior y sus componentes. En esta etapa se buscó obtener experiencia rápidamente para disponer de agilidad en el diseño posterior. En esta etapa se realizaron las pruebas en las aulas con el prototipo antiguo.

La segunda fase del proyecto se centraba en la planificación y la toma de decisiones con respecto a los componentes y a los circuitos que constituirían el nuevo prototipo. La dinámica de trabajo tuvo como objetivo trabajar en diseños orientados al nuevo prototipo, pero manteniendo una gran flexibilidad para realizar cambios.

En la tercera fase se desarrolló la versión final del nuevo prototipo. En esta fase se tomaron las decisiones finales en componentes clave, y sobre todo en la caja. Toda la experiencia adquirida en las primeras etapas se debía aplicar para poder realizar un diseño que integrase los nuevos componentes con los antiguos exitosamente. El trabajo consistió en diseñar la *PCB* teniendo en cuenta las hojas de datos de los componentes para reducir al máximo los posibles errores del diseño.

La última fase consistió en el testeo, la obtención de resultados y la documentación. Se solicitaron tanto la placa como los componentes para su montaje, de forma que se pudiesen probar las mediciones de los nuevos sensores y el funcionamiento en conjunto del prototipo. Por otro lado, se recogió en la memoria toda la información de la placa, las decisiones tomadas y la metodología seguida para crear así una guía del proyecto que pueda facilitar su futuro desarrollo.

### 1.7. Estructura del documento

En el segundo capítulo de esta memoria se muestran, cronológicamente, los pasos seguidos en el desarrollo de la placa del prototipo. Adicionalmente, la memoria también funciona como una guía para el diseño de una *PCB* genérica.

En cada apartado del capítulo se dan recomendaciones y se justifican las decisiones tomadas en ese apartado con respecto al nuevo diseño. Los apartados que conforman la guía son:

- **2.1: Selección de componentes.** Primera selección de componentes fundamentales para el diseño.
- **2.2: Diseño teórico del circuito.** Planificación y desarrollo de los esquemas eléctricos del circuito.
- **2.3: Biblioteca de componentes de la *PCB*.** Organización y creación de los componentes en el programa de diseño.
- **2.4: Carcasa.** Búsqueda e inclusión de la caja del prototipo.
- **2.5: *Layout*.** Distribución de los componentes en el diseño.
- **2.6: Reglas de diseño.** Reglas establecidas por el fabricante que establecen los límites para la fabricación.
- **2.7: *Routing*.** Realización de las conexiones entre componentes en la placa.
- **2.8: *Design Rule Check*.** Comprobación preliminar de errores en la placa.
- **2.9: Pasos Finales.** Revisión final, fabricación, montaje, testeo y obtención de resultados.

## 2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

### 2.1. Selección de componentes

El primer paso en el proceso de diseño es el de seleccionar los componentes que se desean incluir en la placa, ya que la placa es la materialización de un circuito ideal formado por dichos componentes.

Los primeros componentes que se deben buscar son los que marcan la funcionalidad de la placa, en este caso, los sensores. Algunos de estos ya habían sido seleccionados con anterioridad en el primer prototipo, mientras que otros son totalmente nuevos.

#### 2.1.1. Criterios de búsqueda

La búsqueda de los componentes responde a varios criterios, todos ellos igual de importantes. El primero de ellos es el stock; los componentes deben estar disponibles y en la distribuidora *RS Components*. Esto último es crucial, puesto que es la distribuidora que figura en el acuerdo marco con la UPM y hace que los pedidos sean más ágiles.

El segundo criterio es el precio. En el mercado hay una gran variedad de componentes cuyos precios oscilan en céntimos y, en otros casos, en decenas de euros. Encontrar el componente ideal supone que este cumpla con los requisitos propuestos al menor precio posible.

El tercer criterio es la tensión de alimentación del circuito. Los componentes pueden consumir más o menos potencia, pero es importante intentar que la tensión de alimentación para los componentes sea única, o, al menos, que cada uno de ellos no esté alimentado a una tensión diferente. En el caso del nuevo prototipo, el objetivo era tener una tensión de alimentación general de 3.3V para garantizar un consumo bajo, aunque al final se incluyeron tensiones a 5V como excepciones inevitables.

Ligado al anterior criterio de selección está el consumo de corriente. Puede haber componentes con la tensión deseada, pero con una corriente de un valor mucho mayor del que se puede llegar a suministrar. Es importante prestar atención en las hojas de datos de los componentes a las corrientes máximas que pueden suministrar los componentes de alimentación y los dispositivos de potencia para luego cotejarlos con las corrientes que demandan el resto de los componentes. Para ello, es adecuado realizar una tabla de consumos (Tabla 2) en la que figure la corriente máxima demandada.

El cuarto criterio es la comunicación del sensor. La información de los sensores debe transmitirse a un microprocesador, que a su vez debe estar conectado a un módulo de comunicación. Para enviar dicha información hay varias formas y protocolos, los más comunes son la comunicación serie *UART*, la *SPI* y la *I2C*.

Lo que marca la pauta a la hora de seleccionar es el microprocesador y los periféricos que tenga disponibles en sus pines. Preferiblemente se opta por la comunicación serie *UART*, pero esta agota un puerto por cada componente que se desea comunicar con el micro. Por otro lado, con la comunicación *I2C*, se pueden comunicar varios sensores a la vez y dirigirlos a un mismo puerto del microprocesador. Se concluye que se debe prestar atención a los periféricos disponibles para que, a la hora de seleccionar un componente, haya un puerto disponible en el micro con el que se pueda comunicar.

El quinto criterio alude a la carcasa del componente, la cual establece las dimensiones de este, y a la terminación del componente, es decir, a su conexión con la placa. Si se eligen los sensores sin tener en cuenta el tamaño de estos, puede darse el caso de que el diseño de la *PCB* quede demasiado empaquetado y que algunas conexiones no queden bien. También puede darse el caso de que directamente no quepan los sensores en la placa y haya que hacer una selección de nuevo. Por ello, se debe tener especial cuidado con la dimensión que la *PCB* ha de tener. En el caso del nuevo prototipo, las dimensiones máximas de la *PCB* vienen definidas por la caja, que hace de carcasa de todo el nodo sensor.

En lo concerniente a la terminación de los componentes, las terminaciones más habituales son las de agujero pasante y las de montaje en superficie. Las primeras suponen un coste mayor a la hora de fabricar la placa al tener que hacer más agujeros. Por tanto, se ha tratado de elegir componentes con terminaciones de montaje en superficie, los cuales también son más fáciles de soldar.

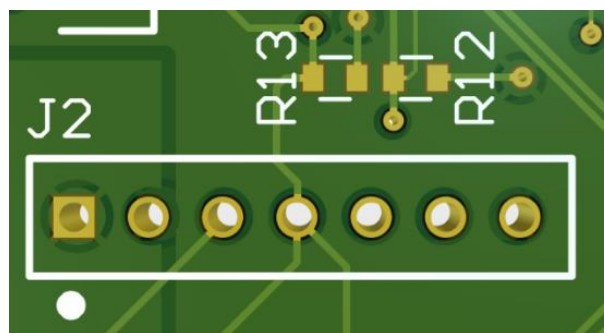


Figura 6. Pads y agujeros pasantes

En la figura 6 se observa un componente con terminación de agujero pasante como es el J2, y dos componentes con *pads* de montaje superficial, las resistencias R13 y R12.

El sexto criterio responde a la calidad y precisión de los sensores en sí. Sin embargo, es un criterio difícil de aplicar ya que requiere confianza por parte del diseñador en la marca del sensor. Algunas veces, la precisión de la medida anunciada en la hoja de datos no se corresponde con la precisión que luego se aprecia en la práctica. Es por eso por lo que, a la hora de seleccionar componentes, elegir marcas probadas con anterioridad y que ofrezcan garantías es probablemente la mejor opción.

El séptimo, y último criterio, aporta un valor añadido a la hora de seleccionar componentes y está relacionado con el sexto. Este valor añadido es la información que el fabricante aporte del propio componente, ya sean hojas de datos, modelos 3D/CAD, huellas de los componentes para *Altium*, etc. Toda información que el fabricante aporte ayuda a entender mejor lo que se está comprando y cómo implementarlo en el diseño.

### 2.1.2. Sensores seleccionados

A continuación, se enumeran los sensores seleccionados con una breve descripción de sus características más relevantes.

#### 2.1.2.1. Sensor de partículas

Para la medición de las partículas en el ambiente se utilizó el sensor HPMA115CO-004, el cual ya figuraba en el anterior prototipo, y, por tanto, su fiabilidad y calidad estaban ya comprobadas de antemano.

El sensor de partículas HPMA115CO-004 de la marca *Honeywell* es un sensor láser de partículas *PM2.5* y *PM10* con una precisión de  $\pm 15\%$ . Se alimenta a 5V y se comunica mediante el protocolo *UART* con el microprocesador. Se caracteriza por ser el que más abulta de todos los componentes del nodo sensor (36mm x 44mm) y por necesitar un conector especial para montarse en la *PCB*, lo que supone una dificultad en su implementación. Además, hay que ser especialmente preciso al colocarlo, ya que sus tres tornillos de fijación deben quedar perfectamente alineados con sus correspondientes agujeros. El modelo seleccionado tiene dos ranuras que utiliza para hacer pasar el aire a su interior y así realizar la medición de partículas con el láser. La toma de expulsión de aire se ha utilizado para favorecer el flujo de aire por el interior de la *PCB* de abajo a arriba.

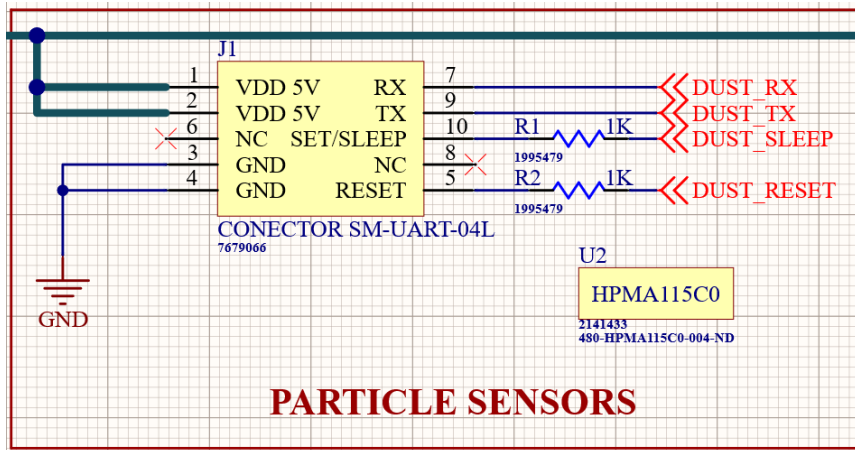


Figura 7. Esquema del sensor de partículas

### 2.1.2.2. Sensor de calidad del aire y gases volátiles

El sensor SGP40 de gases digital de la marca *Sensirion* mide la calidad ambiental y los gases volátiles. Es un sensor de pequeño tamaño (en comparación con otros componentes) con un bajo consumo alimentado con una tensión de 3.3V y se comunica mediante el protocolo *I2C*. Como sensor de nueva inclusión, su fiabilidad de medida deberá ser probada en los ensayos del nuevo prototipo.

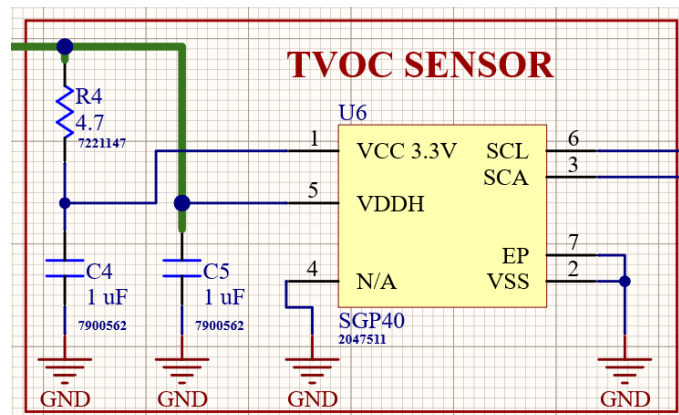


Figura 8. Esquema del sensor de gases volátiles

### 2.1.2.3. Sensores de CO2, humedad y temperatura

El sensor SCD30 de la marca *Sensirion* engloba las mediciones de CO2, humedad y temperatura; todo ello con una precisión de  $\pm 30$  ppm. Es, junto con el sensor de partículas de *Honeywell*, el otro único sensor alimentado a 5V. También es un sensor que figuraba en el prototipo previo.

Se comunica con el microprocesador mediante el protocolo *I2C*, aunque da la posibilidad de comunicarse mediante *UART*. Le caracteriza su elevado tamaño (35mm x 23mm x 7 mm), que se justifica por todo lo que ofrece. Al igual que el sensor de *Honeywell*, necesita un conector adicional para fijarse a la placa.

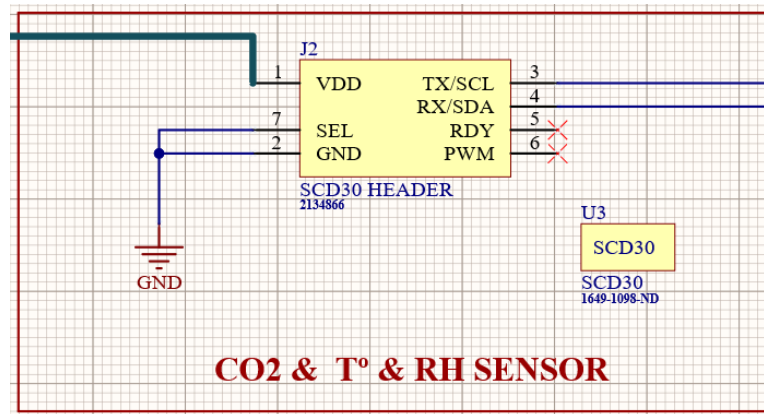


Figura 9. Esquema del sensor de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad

El STH40 de *Sensirion* mide la humedad relativa con una precisión del 1.8%, y la temperatura con una precisión de 0.1 °C. Está alimentado a 3.3V, ofreciendo así un bajo consumo. Se comunica con el microprocesador mediante el protocolo *I2C*. La dificultad que presenta su implementación es que, al ser un sensor de temperatura, requiere estar lo más lejos posible de componentes que se calienten y afecten a la medición. Para evitar esto último se han realizado unos recortes en la parte inferior de la placa que hacen de aislamiento para el sensor. Además, como está situado en la parte inferior de la placa, se evita así que el aire que se calienta por el resto de los componentes le pueda afectar. Por otro lado, el diminuto tamaño del sensor hace que su posicionamiento sea sencillo, y solamente necesita un condensador de desacoplo en su pin de alimentación.

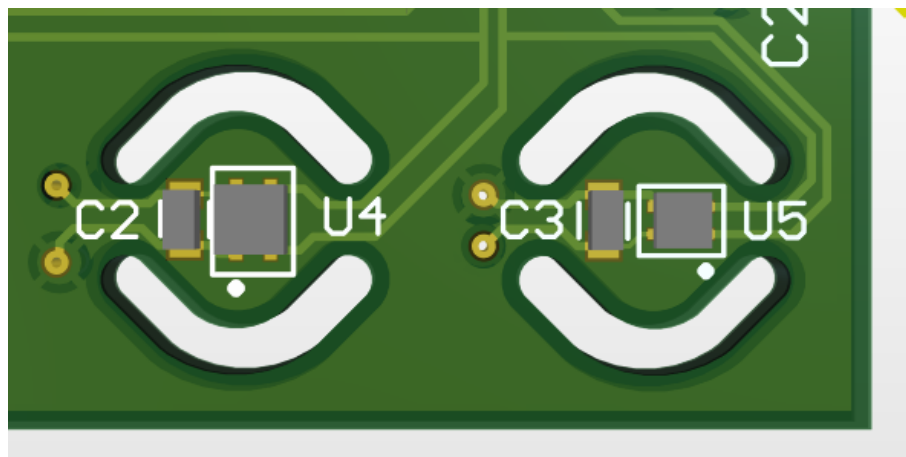


Figura 10. Recortes para el aislamiento térmico del sensor de temperatura

El SHTC3 es otro sensor de *Sensirion* homólogo al sensor STH40 anteriormente mencionado. El funcionamiento del sensor es igual en uno que en otro. Sus diferencias radican en la precisión, ya que el SHTC3 mide la humedad con un error del 2% y la temperatura con un error de 0.2 °C. También les diferencia la distribución de los pines. Esto último impide que puedan compartir huellas y ser sustituibles el uno por el otro en la placa.

La razón de la implementación de los dos sensores simultáneamente es la de poder testarlos para ver cual funciona mejor, puesto que ambos son nuevos. Otra razón es que el stock no siempre está garantizado, y disponer de dos componentes homólogos da una mayor libertad y seguridad para futuros diseños.

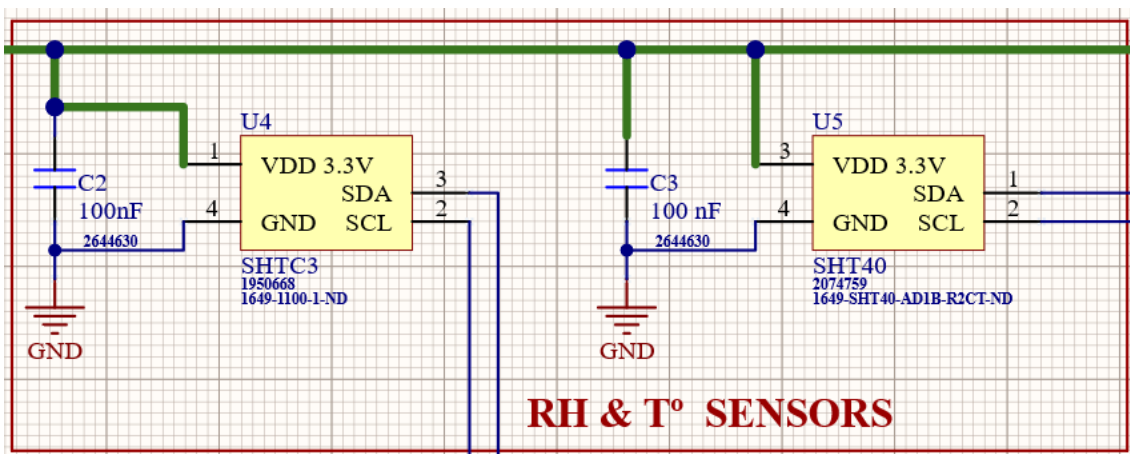


Figura 11. Esquemas de los sensores de temperatura y humedad

El sensor QGS de la marca *KEMET* permite medir el  $CO_2$ . Se alimenta a 3.3V y se comunica con el micro mediante el protocolo *I2C*. Le caracteriza su pequeño tamaño en comparación con el sensor SCD30. Esta característica, junto con su precio competitivo, son las razones de su inclusión, y es que puede llegar a sustituir al SCD30 si su comportamiento en la medición es parecido. Es remarcable también su peculiar carcasa y la situación de sus *pads*. Dichos *pads* requieren unas pistas de un grosor muy estrecho para poder acceder a ellas, lo que no suele ser muy habitual.

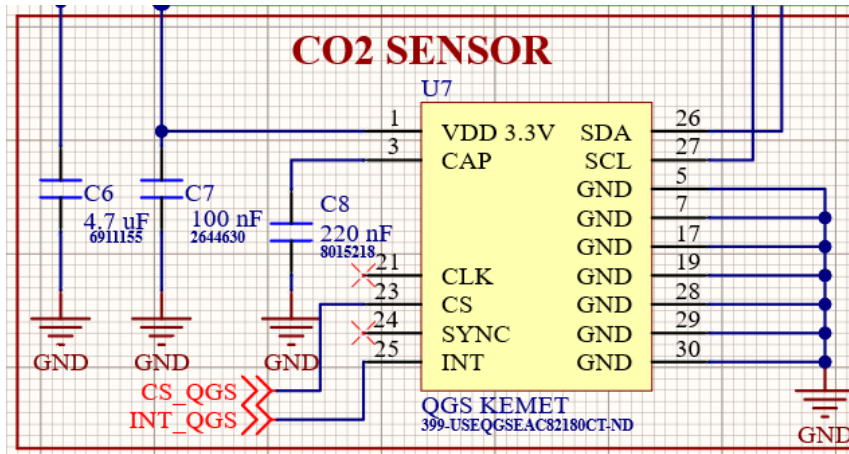


Figura 12. Esquema del sensor CO2 de KEMET

#### 2.1.2.4. Sensor de presencia

El EKMC1603111 de la marca *Panasonic* es un sensor infrarrojo de presencia de larga distancia y fue testado en el antiguo prototipo.

Este sensor *PIR* está alimentado a 3.3V y se comunica con el micro mediante una salida digital conectada a un pin del microprocesador. Le caracterizan la terminación de agujero pasante, sus grandes dimensiones con forma de seta y su importancia en el diseño. Esta importancia viene dada por su necesidad de sobresalir por la cara frontal de la caja una vez situada en la pared para así poder medir adecuadamente la presencia. Adicionalmente, debe estar centrado, ya que la cara frontal no es completamente llana, sino que posee unas zonas en las que su altura varía al acercarse a los laterales. Por ello, y para facilitar el mecanizado, se ha elegido una posición central en el diseño.

El sensor no está orientado a medir el nivel de ocupación de las aulas en el prototipo actual, simplemente informa sobre si hay alguien o no. En una versión futura del proyecto se pretende dar información sobre el nivel de ocupación.

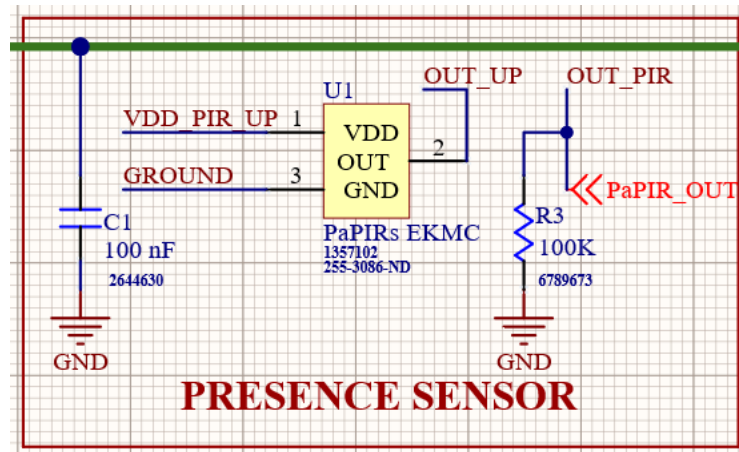


Figura 13. Esquema del sensor de presencia

#### 2.1.2.5. Sensor de ruido ambiental

Para la medición del ruido ambiente, se estudió la posibilidad de realizar un diseño propio que cumpliera con la función. Este diseño consistía en un micrófono de tipo *electret* con una membrana que hace variar una señal de tensión con el impacto de las ondas acústicas. Seguido a este micrófono habría un amplificador con un potenciómetro regulable que permitiría amplificar la señal según se necesitase. Finalmente se instalaría un filtro en la salida para disminuir el rizado de la señal y así disponer de una señal continua.

El diseño se llegó a fabricar (Ver Anexo: Figura 62), pero en las pruebas presentaba muchos problemas en la medición del ruido ambiente debido a otros ruidos causados por la propia placa y la sensibilidad del diseño. Como resultado, se tomó la decisión de prescindir del diseño propio en favor de la compra de un sensor acústico del mercado. El sensor elegido fue el SPK0838HT4H-1.

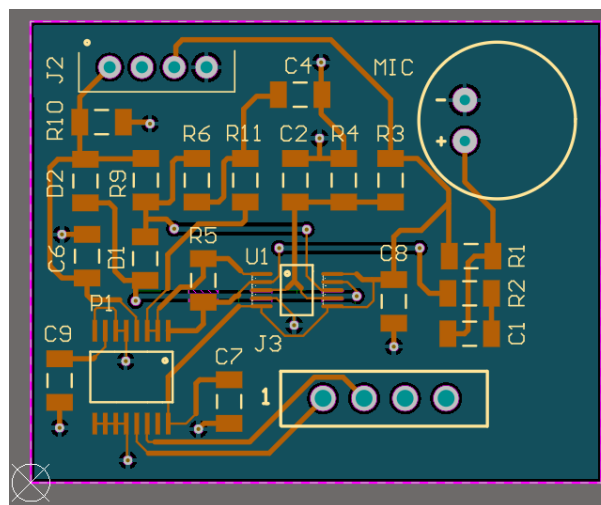


Figura 14. Circuito de audio prototipo

El SPK0838HT4H-1 es un sensor acústico tipo *MEMS* de la marca *Knowles*. Está alimentado a 3.3 V y se comunica con el microprocesador mediante una salida digital. Le caracterizan su baja sensibilidad orientada a medir ruidos a media distancia y su buen comportamiento a altos decibelios con una baja distorsión. Comparte la característica con el sensor QGS de tener una carcasa que requiere pistas muy estrechas para acceder a los *pads*.

Para la transmisión de la información utiliza dos puertos digitales, uno de ellos se encarga de la señal de reloj (input), que permite cambiar los estados del componente, y el otro de la señal de datos (output). Un tercer puerto no digital llamado SEL permite cambiar la detección de flancos según si está conectado a tierra o a la alimentación.

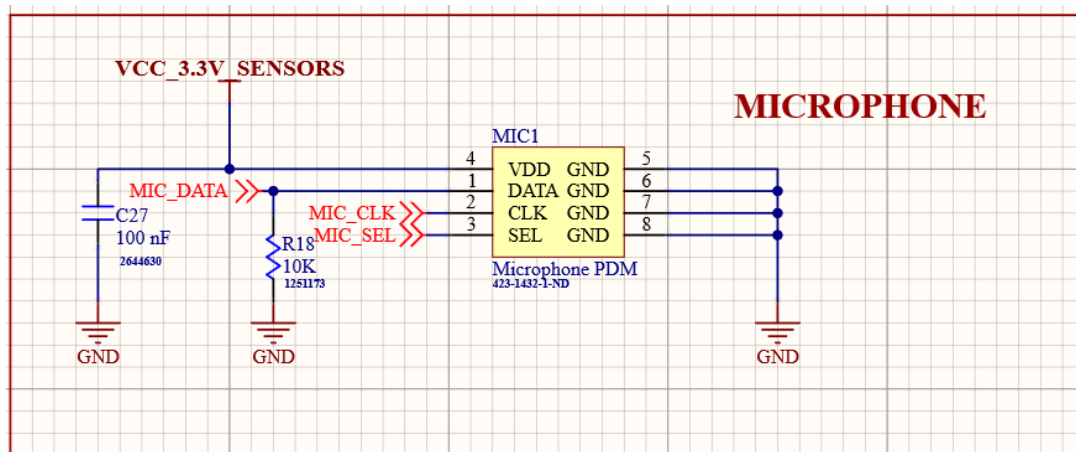


Figura 15. Esquema del sensor acústico

#### 2.1.2.6. Sensor de luz ambiental

En el prototipo antiguo figuraba el sensor TSL2771 como encargado de la medición de la luz ambiental. Su funcionamiento era aceptable, pero realizando búsquedas adicionales se encontró el sensor de alta precisión VEML7700, el cual se presentaba prometedor y a la mitad de precio que su homólogo. Por ello, se tomó la decisión de sustituir el TSL2771 por el VEML7700.

El sensor VEML7700 de la marca *Vishay* permite medir la luminosidad ambiente mediante un diodo fotosensible. Se alimenta a 3.3V y se comunica con el micro mediante el protocolo *I2C*. Se caracterizan por dar la posibilidad de colocarlo boca arriba o de lado. Además, presenta una dificultad de implementación provocada al estar muy lejos de la superficie frontal de la carcasa y, por tanto, para que pueda medir la luminosidad, se requiere la utilización de un tubo de luz con la longitud adecuada. Otro tubo de luz similar se ha utilizado de manera análoga con el led *RGB*.

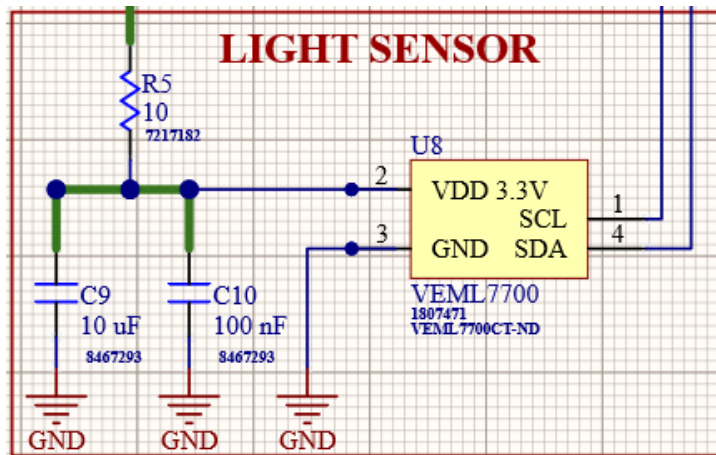


Figura 16. Esquema sensor de luz

### 2.1.3. Componentes de comunicación seleccionados

#### 2.1.3.1. Microprocesador

El microprocesador es el componente fundamental de placa. Es el encargado de recibir las mediciones de los sensores y de transmitirlos al módulo de comunicación. También puede realizar funciones de control como el apagado de sensores o el encendido del led *RGB*. En el microprocesador se instala el firmware que controla el resto de los componentes y establece las comunicaciones según el protocolo correspondiente.

Para este diseño se ha elegido el ATmega1280 por tener la suficiente memoria para soportar el firmware y por estar alimentado a 3.3V. Otros motivos para su elección han sido la variedad de periféricos que ofrece, y la experiencia con la familia de procesadores *ATmega* con la que cuenta el departamento de electrónica de la *ETSII*.

Es de gran relevancia mencionar la necesidad de incluir junto con este componente otros dos conectores que tienen la función de programar el microprocesador e inicializarlo. Estos dos componentes son el conector *JTAG* y el *ISP programmer*.

La razón por la que no se ha introducido el procesador AVR128DB es que, aunque los dos procesadores son de la marca *Microchip*, AVR constituye una familia diferente de microprocesadores con lo que todavía no se ha podido adquirir cierta experiencia. Se estudió la posibilidad de adaptar el firmware utilizado en el ATmega1280 realizando una importación desde el *IDE* de *Arduino* al entorno de desarrollo de *Atmel Studio* con el *Core* del AVR128DB.

El *Core* de un microprocesador engloba las definiciones, funciones y protocolos que el programador puede utilizar al programarlo. En el caso del *Arduino*, permite utilizar funciones como *millis()* o *AnalogWrite()*. Migrar el *Core* de un microprocesador a otro

hace que se pueda programar un microprocesador con la biblioteca de rutinas y el código de otro micro siendo estos, en principio, no compatibles.

Hay herramientas oficiales que permiten importar el *Core* de *Arduino* a microprocesadores de *Microchip*, sin embargo, el chip AVR128DB no forma aún parte de estas al ser un dispositivo demasiado nuevo. La herramienta de exportación disponible actualmente no es una herramienta oficial y todavía no está lo suficientemente pulida como para garantizar un resultado satisfactorio.

También se tuvo en cuenta la opción de adquirir experiencia con el microprocesador estudiando la hoja de datos y escribiendo un nuevo código de control para el nodo adaptado a ese microprocesador, pero finalmente se descartó por la inversión adicional de tiempo y esfuerzo que suponía.

En versiones futuras se pretende sustituir el ATmega1280 por el AVR128DB. Este cambio supone una evolución lógica, que se debe a que la nueva familia *AVR*, aparte de nuevas funcionalidades, tiene un precio muy competitivo con un rendimiento mayor y un mayor número de periféricos.

### **2.1.3.2. Módulo FTDI**

El *FTDI FT232R* es un componente alimentado a 3.3V que permite implementar una conexión *USB* con el microprocesador. Algunos procesadores tienen un puerto de conexión *USB* que permite hacer una conexión directa entre conector y microprocesador. En el caso del ATmega1280 este puerto especial no existe, y se necesita un componente intermedio para establecer dicha conexión. El módulo *FTDI* posee un puerto de conexión con el conector *USB* y otro puerto de conexión con el microprocesador mediante el protocolo *UART*.

### **2.1.3.3. Memoria Flash**

En el diseño original del prototipo no había necesidad de tener una memoria flash, ya que el firmware se podía instalar en el *Arduino* sin problemas y la propia memoria del micro lo podía albergar. Sin embargo, pensando en versiones futuras, se ha decidido implementar una memoria flash con la capacidad suficiente para albergar posibles actualizaciones de firmware que ocupen más espacio. Estas actualizaciones se pretenden hacer mediante el sistema *OTA* (over the air), las cuales son actualizaciones realizadas de forma inalámbrica gracias al módulo de comunicación y sin necesidad de desmontar el nodo sensor una vez desplegado.

El tamaño del firmware puede ir creciendo a medida que se implementen nuevos componentes o se añadan funcionalidades. Además, con la memoria se puede guardar una copia del firmware anterior en el momento de actualizar el micro para así poder tener una copia de seguridad si la nueva actualización no funciona.

La memoria elegida ha sido la SST25VF040B-50-4C-SAF-T de la marca *Microchip* y con 500 KB de capacidad.

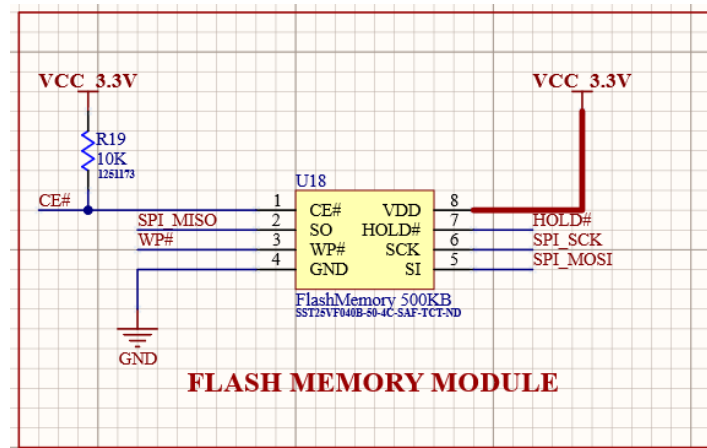


Figura 17. Esquema memoria flash

#### 2.1.3.4. Módulo de comunicación

El módulo *Xbee* es el componente que permite establecer una conexión inalámbrica, mediante el protocolo de comunicación *Zigbee*, con un *gateway* que se comunica con un servidor que almacena la información. Posteriormente dicha información se puede mostrar por pantalla para su interpretación.

La variedad de módulos *Xbee* de la marca *DIGI* disponibles es altísima. Para su selección se han seguido los mismos criterios que con el microprocesador, se ha elegido un modelo con el que se tenía experiencia previa en la programación. En versiones futuras se buscará actualizar el diseño a los nuevos modelos que ofrecen mejores prestaciones con precios más competitivos, además de un stock mayor.

El modelo elegido es el XB24CZ7SIT-004. Se ha optado por un modelo con terminación de orificio pasante que se puede montar en un zócalo de dos conectores adicionales. Esto permite poder montar y desmontar el módulo de la placa al no tener que soldar el componente como si fuera de montaje superficial o de agujero pasante sin zócalo.

El módulo se comunica con el micro gracias a la comunicación serie *UART*, aunque también tiene disponible otras formas de comunicación como la *SPI*. Con el servidor se

comunica mediante una antena adquirida adicionalmente, ya que los modelos que traen de serie una antena en su carcasa no tienen un rango suficiente.

Esta antena no ha sido elegida arbitrariamente puesto que el modelo del *Xbee* seleccionado tiene un conector de antena específico *RPMA* tipo macho. El modelo de antena elegido tenía que ser, consecuentemente, tipo *RPMA* hembra. El modelo seleccionado es la 214415-1011 de la marca *Molex*.

### **2.1.4. Componentes de alimentación seleccionados**

#### **2.1.4.1. Regulador de alterna**

Con la intención de poder alimentar los nodos sensores a la red directamente desde su posición en la pared, se ha elegido un convertidor de alterna a continua BAC05 de 5W de la marca *MURATA*. Este convertidor permite pasar de una tensión alterna de red a una tensión continua de 5V con una eficiencia del 76% (según su hoja de datos) y aportando 1A de corriente a la placa.

La razón principal de su elección es que no requiere componentes externos para su correcto funcionamiento. Todo lo que está en el interior de su carcasa es lo que se requiere para la conversión. Como aspecto negativo, se pueden destacar las abultadas dimensiones de dicha carcasa (25.4mm x 25.4mm x 16.3mm), aunque no destaca especialmente entre el resto de los convertidores disponibles.

En el planteamiento inicial del nuevo prototipo, se pensó en realizar la alimentación con una batería de ion litio para que los nodos fuesen móviles y su instalación fuese más ágil al no necesitar la conexión a la red. Finalmente se descartó la idea debido al coste de las baterías de ion litio, al espacio que ocuparían en la caja y a los problemas que supone su compra y transporte por motivos de regulación y seguridad. Todas esas razones, sumadas a la escasa ventaja que aporta su implementación, llevaron al descarte de la opción en favor de la conexión a la red en combinación con la conexión *USB*.

#### **2.1.4.2. Convertidor reductor**

Una vez se dispone de una tensión de alimentación general de 5V, es necesario rebajarla a los 3.3V con los que se alimenta a la mayoría de los componentes del nodo. Para ello se ha elegido un convertidor reductor tipo *LDO* modelo NCP1117 (versión fija) de 5V a 3.3V que permite obtener un máximo de 1A en la salida. Este convertidor necesita dos condensadores de desacoplo 10  $\mu$ F en la entrada y en la salida para su correcto funcionamiento.

### 2.1.4.3. Convertidor elevador

En el prototipo original se pretendía alimentar el nodo con una batería. Dicha batería tendría dificultades para alcanzar los 5V requeridos por algunos componentes. Por tanto, se escogió un convertidor elevador de 3.3V a 5V para garantizar la tensión objetivo. El componente elegido es el TPS61222 de la marca *Texas Instruments* y con el que ya se había tenido experiencia previa en otros diseños del departamento. Este convertidor tiene la característica de tener un *layout* predefinido por el fabricante muy crítico y que se debe respetar para su adecuado funcionamiento.

Junto con el convertidor se ha instalado una resistencia de 0 ohmios que actúa como puente, evitando la utilización del convertidor. Esta decisión se ha tomado porque en el diseño final, tanto el USB como la red aportan prácticamente los 5V y no es necesaria la utilización del convertidor al no haber batería.

### 2.1.4.4. Interruptores

Con el objetivo de poder desactivar desde el microprocesador los sensores que se deseen, se han implementado una serie de interruptores que cortan la alimentación de los componentes que estén conectados a estos. Los modelos elegidos son los AP2280-2WG-7 de la marca *ZETEX*. Su funcionamiento consiste en un par de bloques comparadores y dos *MOSFETs* que permiten controlar circuitos alimentados con valores máximos de 6V de tensión y 2A de corriente.

## 2.1.5. Componentes adicionales seleccionados

### 2.1.5.1. Led RGB

Se ha incluido en el diseño un led *RGB* de la marca *Kingbright* (el KAAF-5050RGRS-13) con la finalidad de poder transmitir cierta información del estado del nodo al usuario sin tener que conectarse a un ordenador. Estos estados pueden informar sobre si el nodo está alimentado a la red, sobre si está transmitiendo o recibiendo datos o sobre si algo no funciona correctamente. Las combinaciones de colores del led junto con la posibilidad de programar parpadeos con el microprocesador permiten una variedad amplia de opciones.

La ventaja que aporta este led sobre otros leds es que la conexión no está predefinida para cátodo o ánodo común, sino que da libertad de decisión al diseñador para la conexión.

Para poder visualizar el led *RGB* desde fuera, se ha necesitado incluir, al igual que con el sensor de luz, un tubo de luz con la longitud suficiente.

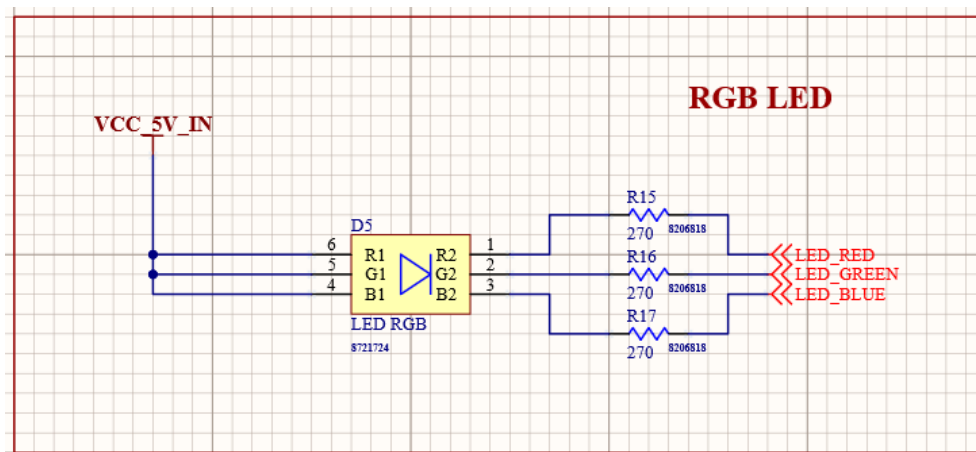


Figura 18. Esquema LED RGB

### 2.1.5.2. Tubo de luz

Los tubos de luz de la marca *Dialight* de 30 mm de longitud y 3 mm de diámetro han sido los componentes elegidos para hacer viable la implementación de un sensor de luz y un led *RGB* en el prototipo. Estos tubos poseen una cabeza con formas diversas y que permite conducir la luz por un conducto hacia la zona interior deseada. En ocasiones, las formas de estos tubos de luz pueden ser variadas. Sin embargo, para este prototipo se han escogido modelos simples tubulares rectos y con cabeza abovedada.

### 2.1.5.3. Conector Micro *USB*

El objetivo del nodo sensor es funcionar de forma inalámbrica gracias a su módulo de comunicación *Zigbee* a la vez que está conectado a la red directamente. No obstante, no está de más incluir un sistema alternativo de comunicación con el servidor para comprobar las mediciones y el estado del nodo sensor en caso de que el módulo de comunicación falle. Esta es la razón de la inclusión de un conector Micro *USB*.

El modelo elegido es el UB-MC5BR3-SDWP604-4S-TF de la marca *JST*. Destaca su diseño, ya que permite que pueda sobresalir por una abertura lateral y así se pueda conectar a un *PC* sin necesidad de desmontar el nodo de la pared.

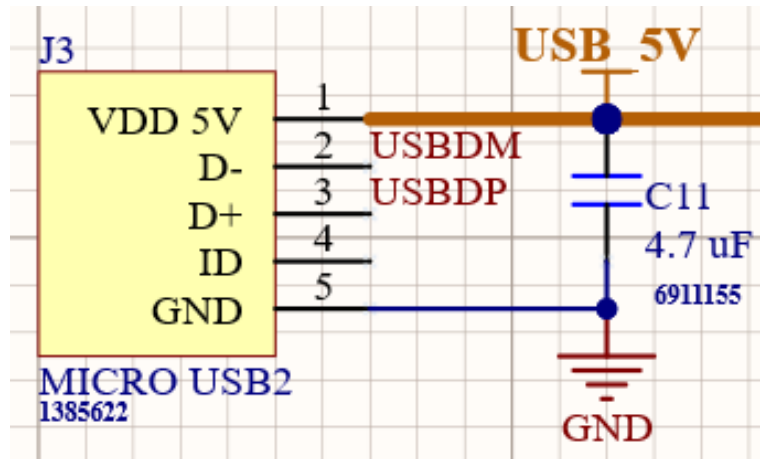


Figura 19. Esquema conector USB

#### 2.1.5.4. Botón de RESET

En ciertas ocasiones, el funcionamiento del nodo sensor puede no ser el esperado o una actualización podría llegar a bloquear el funcionamiento de todo el nodo. Por esas razones, es adecuada la inclusión de un botón de *reset* que pueda apagar y restablecer el funcionamiento del nodo llegado el momento. El modelo elegido es un interruptor táctil lateral de la marca *Panasonic* modelo EVQP7A01P.

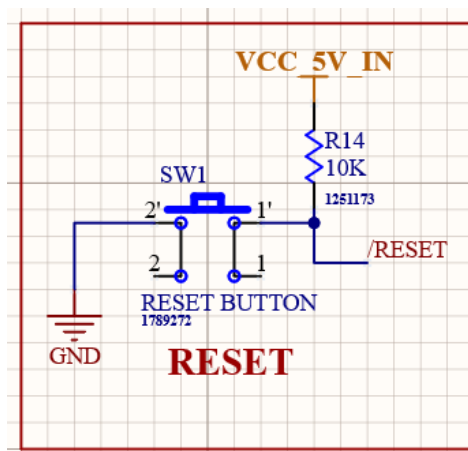


Figura 20. Esquema botón RESET

## 2.2. Diseño esquemático del circuito

Una vez seleccionados los componentes fundamentales, se han de conectar entre sí. El diseño del circuito se realiza primero en unos documentos llamados *Schematics* (.SchDoc) en *Altium* que actúan como diagramas del circuito. En ese proceso se incluyen componentes secundarios como bobinas, condensadores y resistencias. La mayoría de las veces es el propio fabricante el que en la hoja de datos informa de los componentes que se necesitan para el correcto funcionamiento de su producto. Otras veces, se requiere de un simple análisis del circuito para ver que se necesita incluir un condensador de desacoplo o una resistencia que actúe como divisor de tensión.

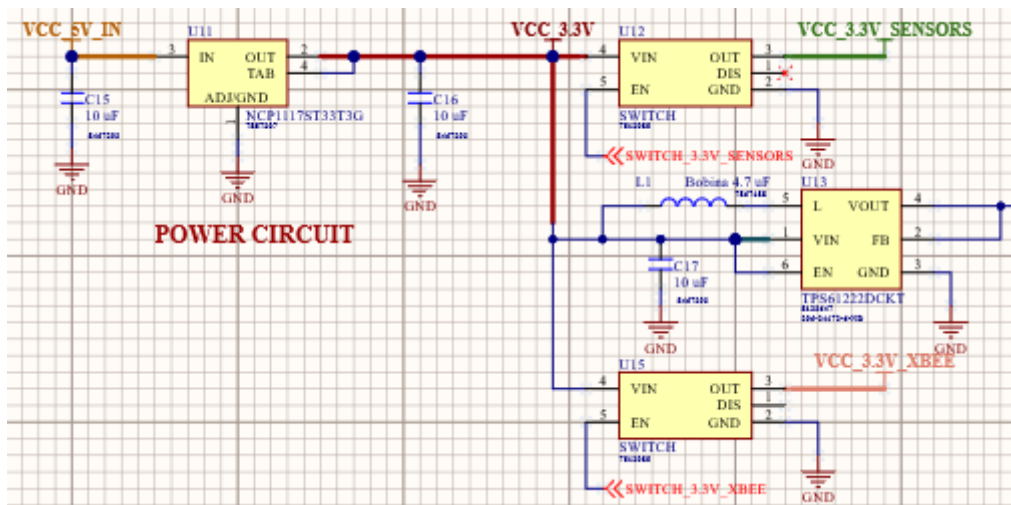


Figura 21. Esquema circuito de alimentación

Se debe repetir el proceso de selección de componentes secundarios ajustándose a los criterios de selección del primer apartado. En el caso de este prototipo, se seleccionaron componentes con huella *0603*, la cual tiene unas dimensiones muy reducidas y permite optimizar mejor el espacio.

Es importante mantener un estilo limpio y claro en la elaboración de los esquemáticos para que otras personas ajenas al diseño puedan entender rápidamente los circuitos. Los documentos tienen la función de crear las Nets que luego se conectarán en la placa, pero también tienen la función de revelar el funcionamiento de esta. Algunas prácticas recomendables pueden ser: distribuir los componentes en páginas con una funcionalidad común, espaciar los componentes para facilitar la legibilidad, nombrar las conexiones de forma que informen de su función o utilizar las *grids* (cuadrículas) para colocar los componentes de forma organizada y agradable a la vista.

### 2.2.1. Símbolos

Antes de realizar las conexiones, se deben crear los símbolos de los componentes. Estos símbolos son la representación visual del componente, normalmente estos son un bloque con pines en las entradas y salidas. Los componentes secundarios, como resistencias, condensadores, diodos y otros, poseen símbolos más elaborados y acordes a los utilizados habitualmente en el análisis de circuitos electrónicos.

El programa *Altium* dispone de una biblioteca de componentes genéricos y de una aún mayor de bloques de componentes de los fabricantes más conocidos. Todos los componentes disponibles de los fabricantes figuran en esa biblioteca, pero no todos poseen el modelo del bloque del componente con sus entradas y salidas. Si el componente a incluir en el diseño no tiene su modelo correspondiente, hay que crearlo en una biblioteca propia.

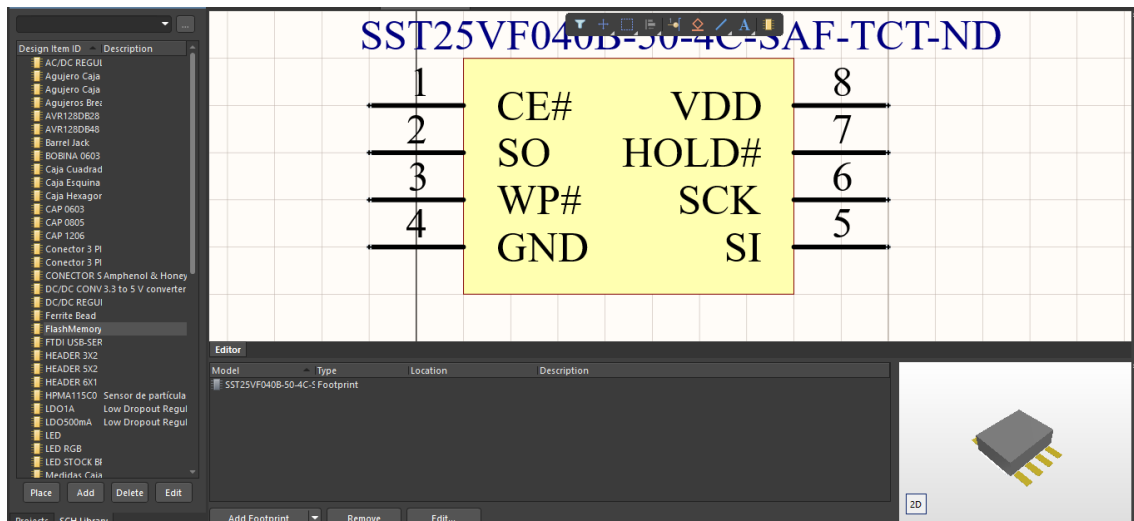


Figura 22. Creación de los símbolos de los componentes

Es recomendable la creación de una biblioteca propia (.SchLib) con todos los componentes a incluir en el proyecto, pues esto permite la edición y la comprobación con las hojas de datos de cada componente.

### 2.2.2. Esquemáticos del prototipo

NOTA: todos los planos esquemáticos de este apartado se pueden consultar en el Anexo a tamaño de página completa

#### 2.2.2.1. Sensores

En el esquemático de *SIMAS Sensors* (Figura 23) se pueden apreciar todos los sensores que están montados en el prototipo. Se ha optado por hacer una distribución que divide horizontalmente el documento en sensores alimentados a 5V y sensores alimentados a 3.3V.

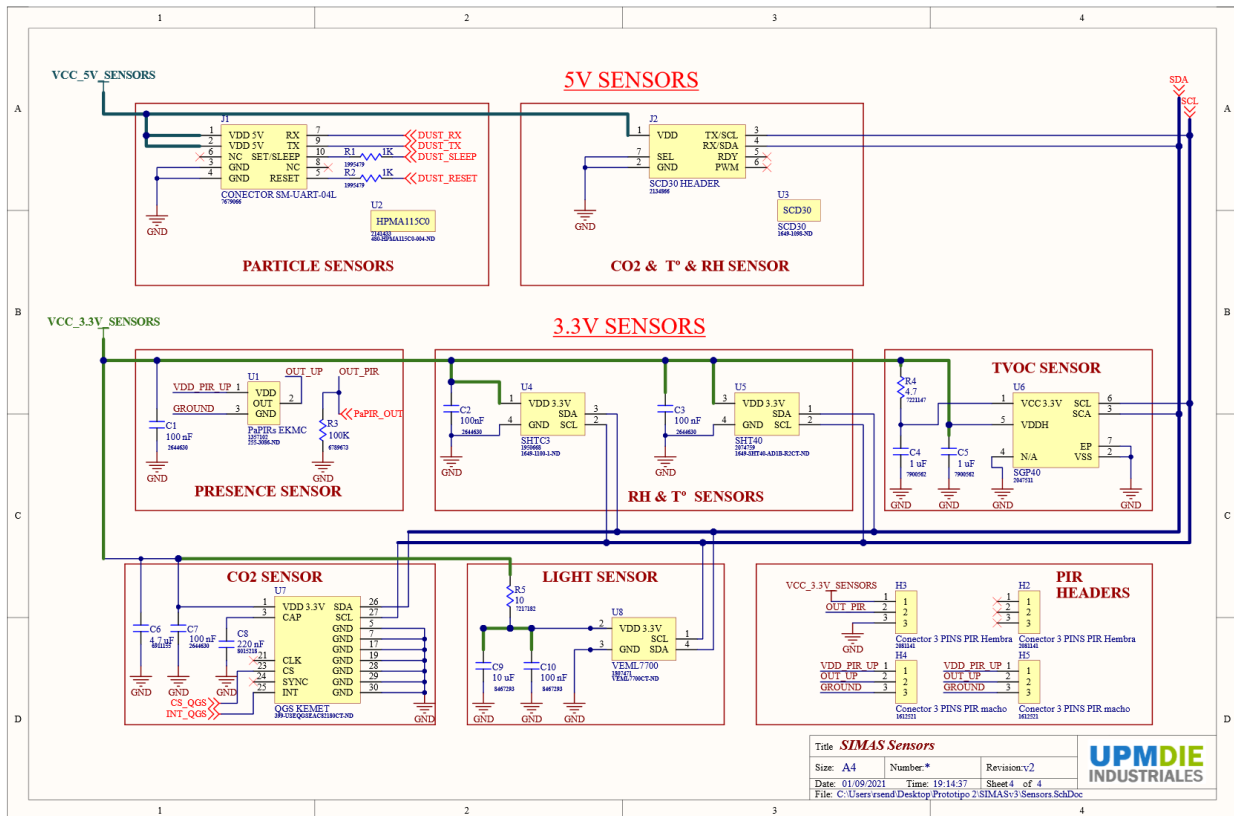


Figura 23. Esquemático SIMAS Sensors

Los sensores alimentados a 5V tienen la característica de tener dos símbolos en vez de uno. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, constan de un conector y del propio sensor. Los símbolos con el indicador J hacen alusión a los conectores, mientras que los símbolos con el indicador U se refieren a los sensores.

Todos los sensores de este documento están comunicados al microprocesador, el cual está localizado en otro documento diferente. Para realizar la conexión entre elementos en diferentes documentos se ha utilizado el símbolo "off sheet connection". El ejemplo

más claro está en las líneas *SCL* y *SDA* de conexión de los sensores con comunicación *I2C*. Otro ejemplo está en el sensor de partículas y sus salidas *RX* y *TX* de conexión *UART*. El último caso se encuentra en el sensor de presencia con su señal de salida digital.

### 2.2.2.2. Alimentación

El esquemático que tiene todos los componentes encargados de la alimentación es el *SIMAS Power* (Figura 24). Para una mejor comprensión de este documento, se recomienda estudiarlo en el siguiente orden: primero el bloque *USB & Supply Network*, luego el *FTDI USB Module*, y finalmente el *Power Circuit*.

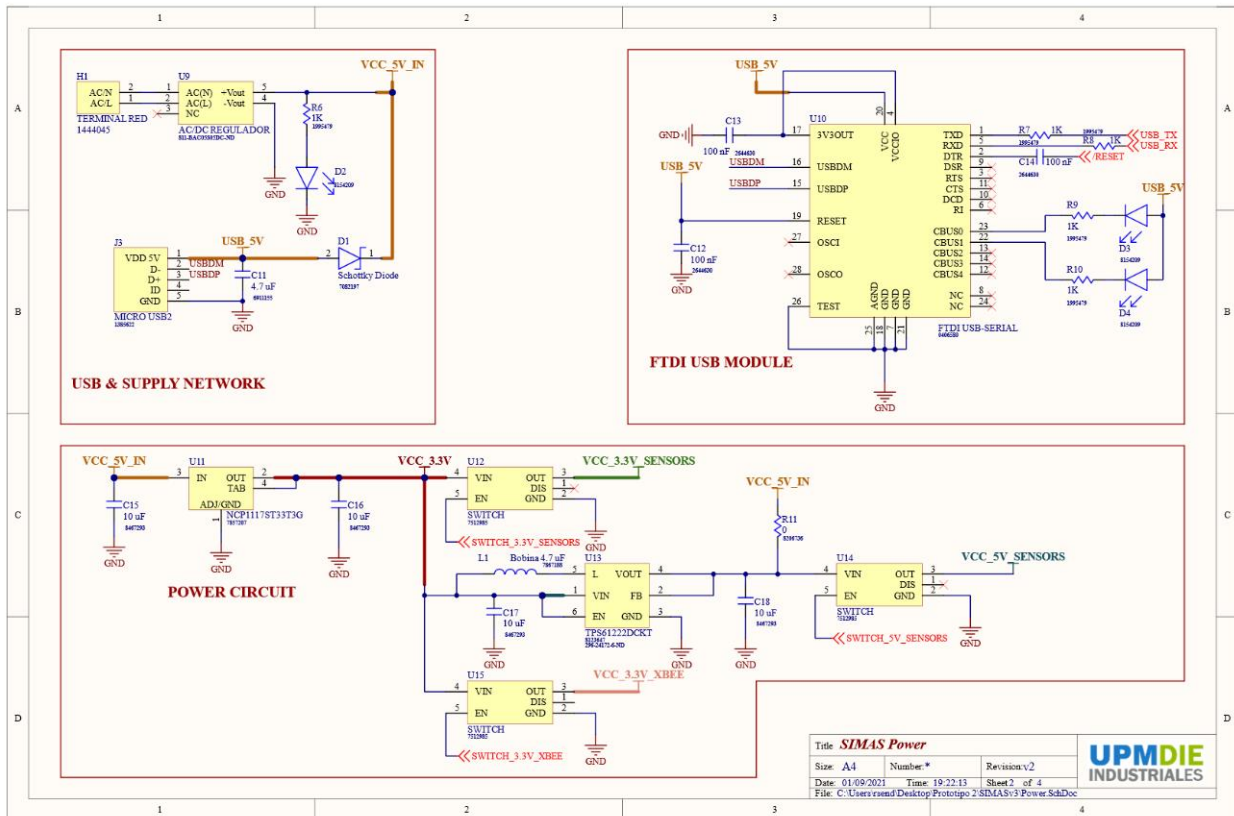


Figura 24. Esquemático SIMAS Power

En el bloque *USB & Supply Network* se encuentra el bloque terminal con el que se conectan los cables a la red, el cual está conectado al regulador de alterna a continua. En paralelo está el conector *USB*, conectado a un diodo Schottky para que, si la alimentación a la red está activa, la energía la tome de esta última al haber más tensión en el circuito de la red que la que hay en el del *USB*. Si los cables de red no están

conectados, habrá más tensión en el lado del conector *USB* (si está conectado), y la corriente que circule provendrá del *USB*.

Conectado tanto al *USB* como a la salida del regulador de alterna se ha colocado un led con una resistencia para limitar la corriente. La finalidad de este led es la de dar información sobre el estado de la alimentación del circuito.

El bloque *FTDI USB Module* recoge al completo el componente FTDI FT232RL y sus salidas. Este componente hace de nexo entre el conector *USB* y el microprocesador. Lo más remarcable es la implementación de dos leds en los puertos CBUS0 y CBUS1, los cuales están programados por defecto como indicadores de la transmisión y la recepción de datos en la comunicación *UART*.

El último bloque *Power Circuit* es el encargado de suministrar la alimentación a todos los componentes del circuito. El bloque se interpreta de izquierda a derecha, comenzando desde los 5V que se obtienen en el bloque *USB & Supply Network*.

El primer componente que se puede encontrar es el convertidor *LDO* de 5V a 3.3V. Este convertidor permite obtener una tensión de 3.3V constante y con los suficientes amperios en la corriente. En la salida de este convertidor se tiene la señal de *VCC\_3.3V*, la cual alimenta a los componentes que requieren 3.3V y que siempre deben estar funcionando en el sistema. Estos son el microprocesador y la memoria flash.

A continuación, está situado el primer interruptor U12, y un poco más abajo se encuentra el convertidor elevador de 3.3V a 5V, seguido de otro interruptor que controla la alimentación de los sensores de 5V.

Entre el convertidor de 3.3V a 5V y el interruptor de alimentación de 5V se ha decidido implementar una resistencia opcional de 0 Ohmios. La razón de esta decisión viene dada por el crítico funcionamiento del elevador de 3.3V a 5V. De esta forma, aunque ese convertidor no funcione correctamente, se puede instalar la resistencia de 0 Ohmios que permita aplicar los 5V a los sensores. Finalmente se encuentra el interruptor que controla la alimentación del módulo de comunicación *Xbee*, controlado a 3.3V.

### **2.2.2.3. Comunicación**

En el documento *SIMAS ATmega & Comms* (Figura 25) figuran los componentes necesarios para el control del nodo sensor y la comunicación. Estos son el microprocesador, el módulo *Xbee*, los conectores de programación *ISP* y *JTAG*, el botón de reset y el cristal oscilador de 16 MHz.

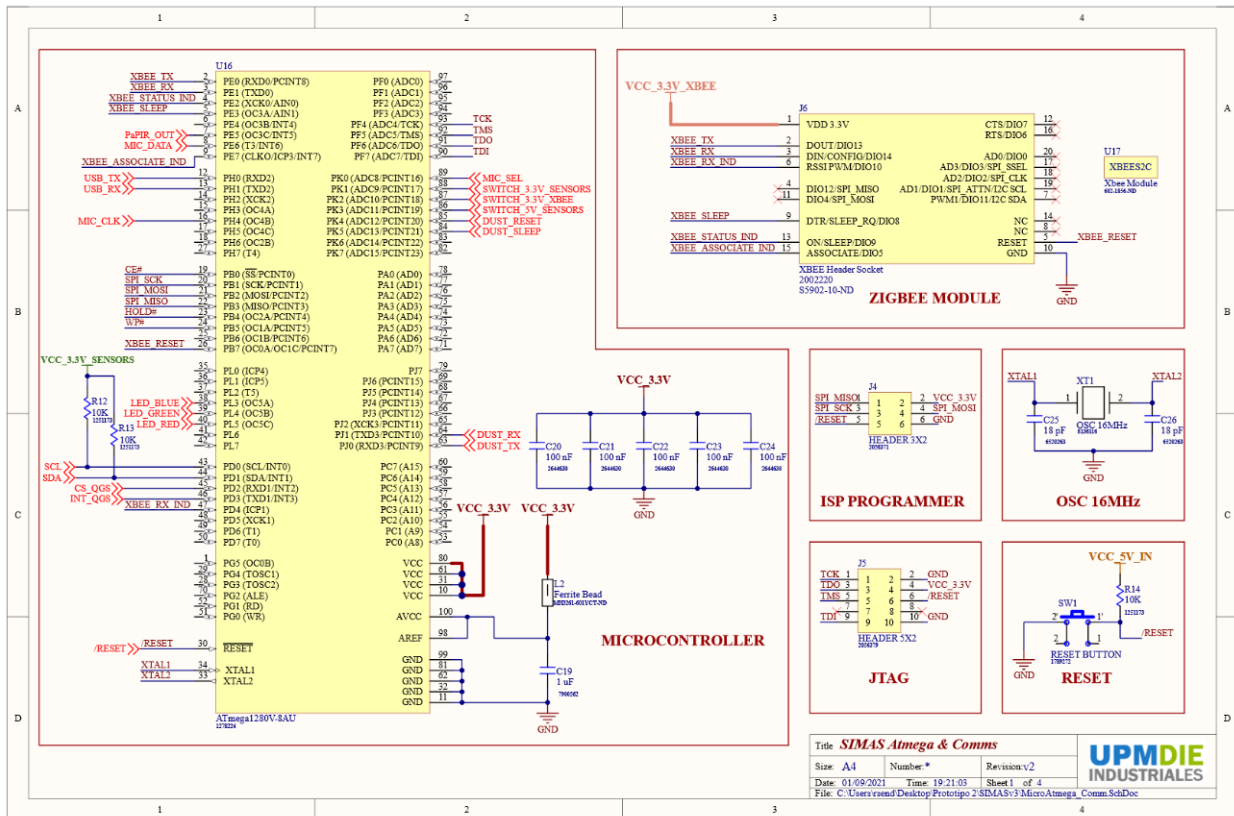


Figura 25. Esquemático SIMAS ATmega & Comms

Las conexiones en este documento dejan poco espacio a la creatividad del diseñador, pues muchas señales solamente pueden ir de un puerto a otro. Lo único que se puede variar son los puertos a los que se dirigen las señales. Esto puede llegar a ser de ayuda a la hora de hacer el *layout* de la placa porque acorta la longitud de las pistas y optimiza el diseño.

Es destacable la inclusión de dos resistencias de *pull-up* en las líneas de la conexión *I2C* y los cinco condensadores de desacoplo para los pines de alimentación del microprocesador. También se ha introducido una ferrita en el puerto de del comparador analógico, aunque no sería estrictamente necesaria.

Se debe tener un especial cuidado a la hora de conectar los pines de comunicación entre dispositivos, ya que algunos de estos pines tienen el mismo nombre en los dos componentes que pueden dar a entender que se tienen que conectar. En el caso de los pines de *SDA* y *SCL* de la comunicación *I2C*, se tiene que conectar el pin *SDA* del sensor con el pin *SDA* del microprocesador, y lo mismo ocurre con el *SCL*. Por otro lado, en la comunicación *UART*, el pin *RX* del sensor se ha de conectar con el pin *TX* del

microprocesador, y el pin *TX* del sensor se ha de conectar con el pin *RX* del microprocesador.

### 2.2.2.4. Componentes adicionales

En el último de los documentos, el *SIMAS RGB & MIC* (Figura 26), se pueden encontrar componentes auxiliares o que se han añadido para dar funcionalidades adicionales. Estos componentes son: el led *RGB*, el sensor acústico y la memoria flash.

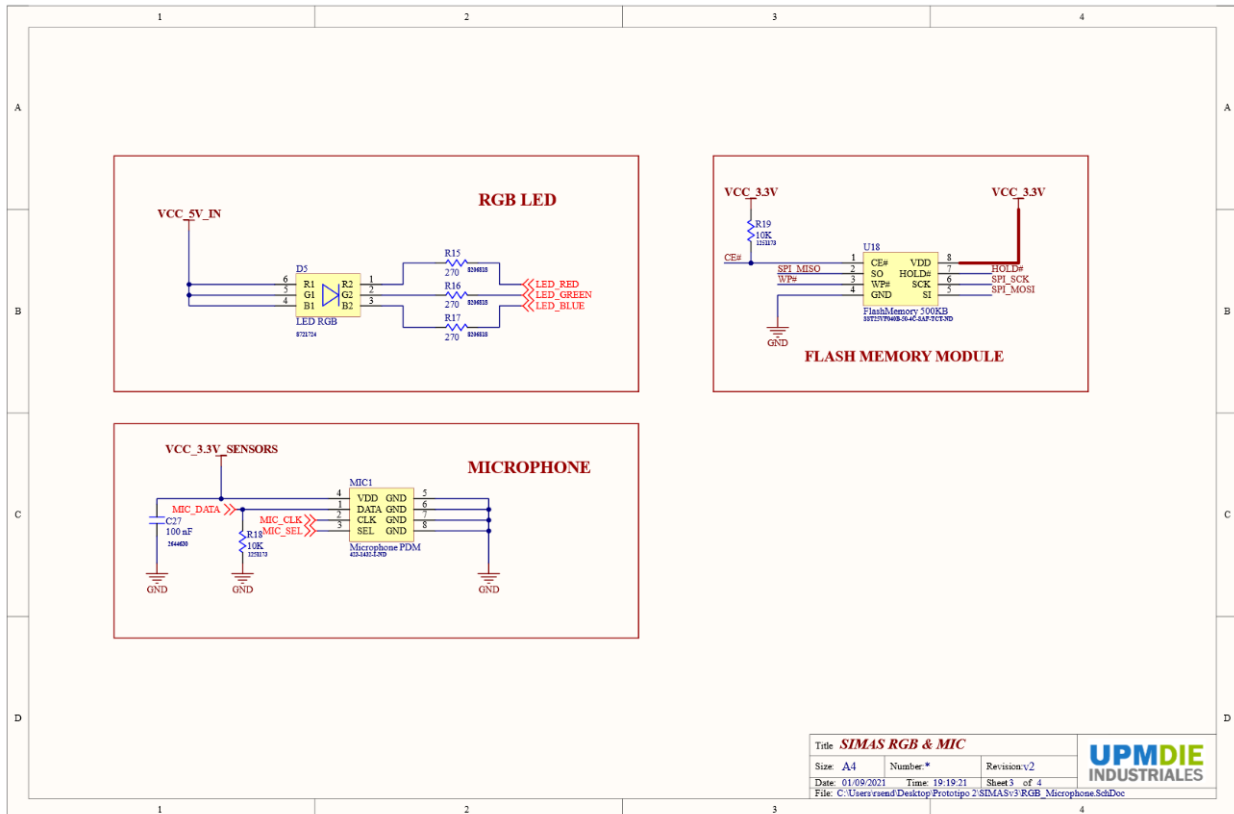


Figura 26. Esquemático SIMAS RGB & MIC

### 2.3. Bibliotecas de componentes de la PCB

Una vez realizados los esquemáticos, ya se podría pasar a diseñar la placa. No obstante, hay un paso intermedio entre esos dos procesos y que resulta de vital importancia. Este paso es la realización de las footprints o huellas de los componentes.

#### 2.3.1. Descripción

En los esquemáticos, un componente se representa como un símbolo o como un bloque con unos pines que se conectan entre sí. En la placa, los componentes tienen huellas, las cuales representan la terminación del componente y sus dimensiones. Al crear una huella, se está creando la terminación que conecta la placa con el componente. Además, se pueden incluir en otras capas las dimensiones del componente y un modelo 3D del mismo que ayude a situarlo mejor en la placa posteriormente.

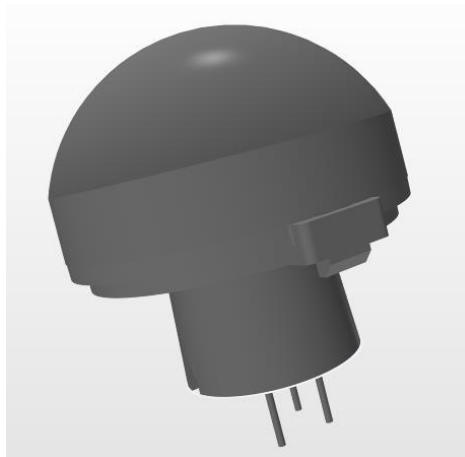


Figura 27. Modelo 3D del sensor de presencia

Con estas huellas ocurre lo mismo que con los símbolos de los esquemáticos; algunos están en la biblioteca de *Altium*. En este caso conviene realizar uno mismo sus propias huellas con las medidas de *pads* y/o agujeros que indique el fabricante en las hojas de datos. La ventaja principal es que habrá consistencia en las capas y los grosores de línea utilizados, lo que resultará en un conocimiento de la huella del componente mucho mayor.

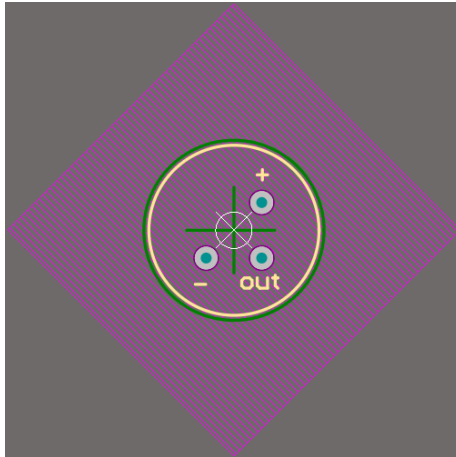


Figura 28. Huella 2D del sensor de presencia

En la realización de la huella, también se establece la capa de serigrafía (Overlay) que muestra información sobre dónde está cada componente y sus dimensiones. Sin esta capa sólo se verían los *pads* y habría que soldar los componentes mirando la pantalla del ordenador para ver dónde está cada uno.

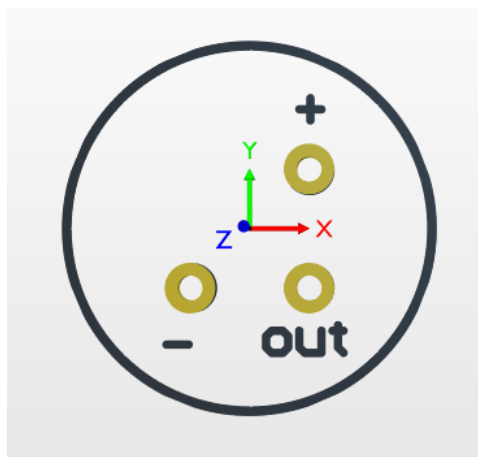


Figura 29. Vista de planta 3D de los agujeros del sensor de presencia

### 2.3.2. Supplier Link

En este paso también se puede aprovechar para incluir el *supplier link* del componente si no se ha hecho con anterioridad. Un *supplier link* es el enlace entre un componente creado en el programa con uno real. Es útil, puesto que permite acceder a la información del componente real con un par de clics y porque todos ellos figurarán en el *BOM* (Bill of Materials) cuando se termine el diseño (documento que recoge todos los componentes utilizados y que permite hacer pedidos de forma sencilla).

## 2.4. Carcasa

La caja podría considerarse como otro componente más a seleccionar, pero su importancia es tal que en algunos casos es lo que define todo el desarrollo posterior. La caja aporta una mayor protección al diseño, la posibilidad de utilizarlo en una mayor variedad de situaciones y una clara mejora visual. Rara vez se utiliza una *PCB* sin una caja a no ser que sea un prototipo que esté en pruebas.

Aspectos tan importantes como las dimensiones de la placa o la distribución de los componentes vienen limitados por la caja. Por ejemplo, la inclusión de un tornillo de anclaje puede provocar tener que recolocar todos los componentes si ya se había realizado una distribución previamente. Otro posible inconveniente es que la placa final no se pueda encajar en la caja porque hace tope con los bordes si se ha sobredimensionado. Estas razones remarcan la importancia de seleccionar una caja antes de comenzar con el diseño de la placa en sí. De esta forma, todo el diseño posterior estará en consonancia y optimizado para esta.

Es recomendable a la hora de elegir una caja fijarse en los requisitos que presenten la funcionalidad del diseño. Ceñirse a necesidades como la ventilación de la caja, la posibilidad de anclarse a una pared o tener un diseño con una protección especial es lo más importante. En segundo lugar, se podría recomendar elegir una caja lo más grande posible para disponer de una mayor libertad en el diseño; aunque hay veces en las que un diseño reducido es el objetivo principal.

### 2.4.1. Requisitos

Se requería una caja que se pudiese anclar a una pared y estuviese ventilada. Además, era importante que no hubiese que mecanizar demasiado la caja original, ya que estos procesos encarecen mucho el producto.

### 2.4.2. Modelo seleccionado

El modelo escogido en este proyecto es el de una caja hexagonal destinada a *IoT* de la marca *CamdenBoss* (CBHEX1-XX-XX). La caja posee unas dimensiones (131mm x 122mm) que permiten crear un diseño con el suficiente margen de espacio entre componentes y, sobre todo, posee la altura suficiente para incluir algunos componentes con alturas mayores que la media. También tiene ventilación en cuatro de sus seis lados, una abertura en la cara posterior para introducir los cables de alimentación desde la pared y se puede anclar a la pared con un accesorio adicional.



Figura 30. Modelo 3D de la carcasa CBHEX1

Con estas características, la caja supone una elección ideal para el proyecto y no requiere más mecanización que unas pequeñas aberturas para introducir el *USB* y la antena de comunicación. También se necesitan tres agujeros destinados al sensor de presencia, el sensor de luz y el led de información.

#### 2.4.3. Modelos adicionales

Aparte del modelo elegido, se estudiaron otras dos posibles carcasas de la misma marca que también cumplían los requisitos de ventilación y de anclaje a la pared. Estos eran el CB1500-10Vxx y el CBRS01VWH.

El CB1500-10Vxx tenía la ventaja de poder aportar, a priori, la profundidad suficiente para que las alturas de los componentes no supusiesen un problema. El inconveniente está en que la caja tiene dos posibles posiciones para montar la *PCB*. Una permite aprovechar la altura de la caja, pero está en la parte que se estrecha, reduciendo la superficie máxima posible de la *PCB*. La otra está situada en la parte más amplia, pero la altura hasta la superficie frontal es insuficiente para el correcto montaje de los componentes.

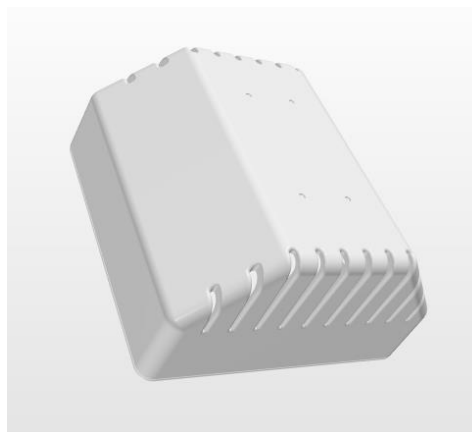


Figura 31. Modelo 3D de la carcasa CB1500-10V

El CBR01VWH, por otro lado, aparentaba ser la solución ideal para los nodos, ya que tiene un diseño más simple y reducido que el modelo hexagonal. La razón para su descarte coincide con la de la caja anterior debido a la escasa altura que tiene, dificultando la inclusión de varios componentes. Otra razón fue el poco margen de espacio del que disponía la *PCB* una vez montada en la carcasa.

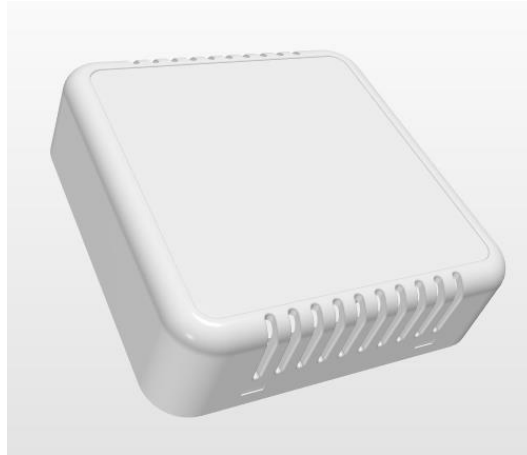


Figura 32. Modelo 3D de la carcasa CBR01VWH

## 2.5. Layout

Una vez se dispone de los documentos esquemáticos con los circuitos a implementar y las footprints de los componentes han sido creadas, el siguiente punto es el de distribuir los componentes en la placa.

El primer paso en este proceso consiste en delimitar las dimensiones de la placa. El criterio es sencillo, se debe intentar obtener el mayor espacio posible que quepa en la carcasa. Una mayor superficie de placa permite mayor libertad a la hora de colocar los componentes a la vez que mejora la disipación de calor, y también se facilita el posterior enrutamiento de los componentes.

Para este diseño, el límite lo ha marcado el horno de soldadura del departamento, que no admite placas de más de 100 mm x 150 mm. Por otro lado, la caja es la que ha provocado que se opte por un diseño octogonal. Un diseño hexagonal aprovechando la propia forma de la placa habría sido idóneo, pero las dimensiones máximas rectangulares hicieron que se tuviesen que recortar los laterales para no sobrepasar los 100 mm. Finalmente las dimensiones del prototipo son 123 mm x 96 mm.

Cuando se han establecido las dimensiones de la *PCB*, se procede a importar los componentes y a su colocación. El criterio a seguir en este segundo punto depende de

cada proyecto, de la función que tenga la placa y de los componentes que utilice. En este caso, hay ciertos componentes que definen la posición del resto.

El componente más importante a la hora de realizar la distribución es el sensor de presencia *PIR*. Su función requiere que esté situado en el medio de la placa, ya que debe sobresalir por la cara frontal de la caja para medir la presencia. El tamaño de este componente ya supone una limitación a la hora de colocar el resto.

La altura de este componente no permitía su adecuado funcionamiento en la caja actual, ya que la altura de esta es mayor que la altura a la que se encuentra la parte del sensor que debe sobresalir para realizar las mediciones. Para solventar este problema, se ha ideado una solución que permite elevar el componente gracias a unos conectores tipo hembra especialmente altos de la marca *Samtec* que casan con los conectores tipo macho de la misma marca.

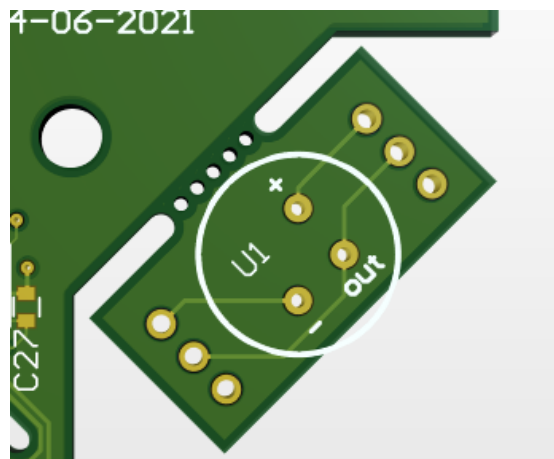


Figura 33. Placa del sensor de presencia troquelada

Como los conectores mencionados ya ocupan el lugar en el que debería estar el sensor de presencia, se ha tenido que recurrir a colocar el sensor en una placa adicional (Figura 33), la cual se montará encima de los conectores a la altura correspondiente. Esta placa adicional se puede separar de la placa principal al tener unos pequeños taladros que actúan como troquelado y que facilitan la rotura de la unión.

El segundo componente más importante es el módulo de comunicación *XBee* (Figura 34). Como va ligado a una antena, es importante colocarlo centrado y en la parte superior de la placa para salvaguardar una simetría visual.



Es importante señalar la necesidad de extender al máximo el borde superior de la placa para que el conector *USB* y la antena sobresalgan lo necesario (Figura 36). Estos dos componentes deben superar el grosor de la pared lateral de la placa y así, mediante unas aberturas, poder acceder a ellos.

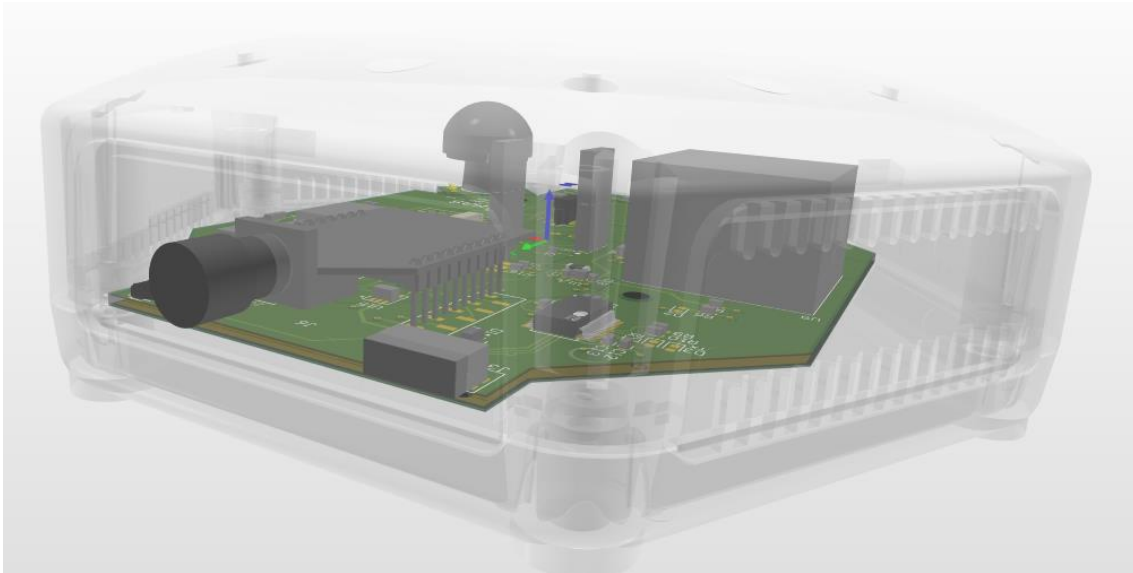


Figura 36. Vista lateral 3D de la PCB integrada en la caja

## 2.6. Reglas de diseño

### 2.6.1. Descripción

Una vez colocados los componentes en la superficie de la placa, es conveniente establecer unas reglas de diseño que marquen los límites de este. Las reglas de diseño vienen dadas por el fabricante al que se va a solicitar la fabricación de las placas. Cada fabricante tiene sus opciones de fabricación y sus limitaciones según la maquinaria y los materiales que utilice. Por tanto, es importante establecer las reglas antes de realizar el diseño y así no tener que reajustar y hacer cambios una vez que ya está finalizado.

Las reglas de diseño marcan límites que se muestran como errores en caso de equivocación, a veces en tiempo real y otras veces en el *design rule check*. Algunos ejemplos de estos errores se dan a la hora de situar componentes, al hacer el enrutado de las pistas o al hacer agujeros mecánicos demasiado grandes o pequeños.

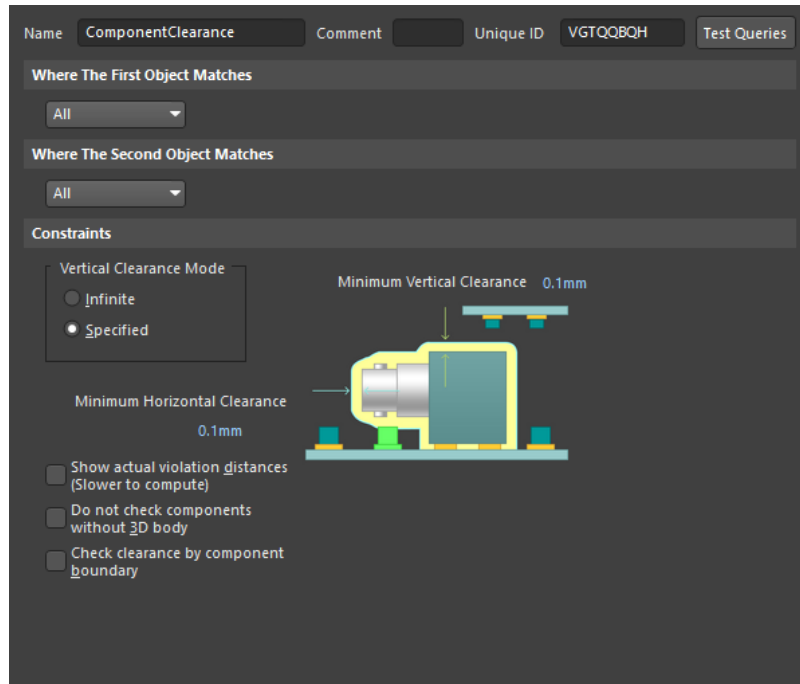


Figura 37. Restricciones de espaciado para la situación de componentes

### 2.6.2. Reglas del prototipo

Para este prototipo se solicitaron las primeras placas de prueba al fabricante *JLPCB* cuyas reglas de diseño son las siguientes:

#### **Propiedades de la Placa**

Capas de la <i>PCB</i>	1,2,4,6
Dimensión Máxima	400x500
Espesor <i>PCB</i>	0.4/0.6/0.8/1.0/1.2/1.6/2.0mm
<i>Solder mask</i> mínimo	0.05mm
<i>Solder bridge</i> mínimo	0.2mm

#### **Agujeros y Pads**

Tamaño Agujero	0.20mm-6.30mm
Diámetro Mínimo Agujero Vía	0.20mm
Diámetro Mínimo Vía	0.4
Agujero Orificio Pasante	0.20mm-6.35mm
Tamaño del <i>Pad</i>	0.70mm-6.35mm
Agujero sin metalizar Mínimo	0.50mm
Anillo mínimo de cobre en	0.2mm

**Separaciones Mínimas**

Entre agujero y agujero	0.5mm
Entre vía y vía	0.254mm
Entre <i>pad</i> y <i>pad</i> sin agujero	0.127mm
Entre <i>pad</i> y <i>pad</i> con agujero	0.5mm
Entre vía y pista	0.254mm
Orificio pasante y pista	0.33mm
Agujero sin metalizar y pista	0.254mm
Entre <i>pad</i> y pista	0.2mm
Entre pista y borde de placa	0.2mm
Entre <i>pad</i> y <i>Silkscreen</i>	0.15mm
<b><u>Propiedades de las pistas</u></b>	
Grosor de pista mínimo	0.127mm
Espaciado mínimo entre pistas	0.127mm

**2.7. Routing****2.7.1. Definición**

*Routear* una PCB es establecer los cables que conectan un componente con otro en un circuito. Estas pistas son el cobre que conectan los pines de un componente. Esta parte del proceso de diseño se realiza una vez se han distribuido los componentes y se han establecido las reglas de diseño.

A la hora de *routear*, lo primero que conviene pensar es en el número de capas que va a tener la placa final. Estas capas se definen con la herramienta *Layer Stack Manager*. No se deben confundir estas capas de materiales diferentes (cobre, dieléctrico y núcleo) con las capas artificiales que el diseñador establece en el proceso de diseño y que ayudan a diferenciar elementos.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01016mm	3.8	
1	Top Layer		Signal	1oz	0.035mm		
	Dielectric 2	PP-006	Prepreg		0.2mm	4.6	0.02
2	Inner Layer 1	CF-004	Plane	1oz	0.0175mm		
	Core	Core-009	Core		1.065mm	4.6	0.02
3	Inner Layer 2	CF-004	Plane	1oz	0.0175mm		
	Dielectric 3	PP-006	Prepreg		0.2mm	4.6	0.02
4	Bottom Layer		Signal	1oz	0.035mm		
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01016mm	3.8	
	Bottom Overlay		Overlay				

Figura 38. Opciones del *Layer Stack Manager*

En el *Layer Stack Manager* se pueden definir los parámetros de las diferentes capas, estos son: su grosor, su material, su peso sus constantes dieléctricas y sus nombres. Es aquí donde se define también si una capa actúa como capa de señales o como planos de alimentación.

Una capa en una *PCB* puede tener varias aplicaciones como, por ejemplo, la de establecer un plano de masa o de alimentación. Este plano se conecta a los terminales de un componente mediante vías que hacen de conductos perpendiculares a la placa y que atraviesan las capas de esta. Adicionalmente, en una capa que sea un plano, se pueden establecer ciertas regiones diferentes para distintas señales. En el caso de este prototipo, una de las capas interiores actúa como plano de alimentación y posee diferentes regiones según la tensión de alimentación que se necesite en esa región.

En la figura 39, la región morada es la tensión de alimentación de 5V, la región roja es la tensión de alimentación general de 3.3V, la región azul es la tensión de 3.3V de los sensores y la región amarilla es la tensión de los sensores de 5V.

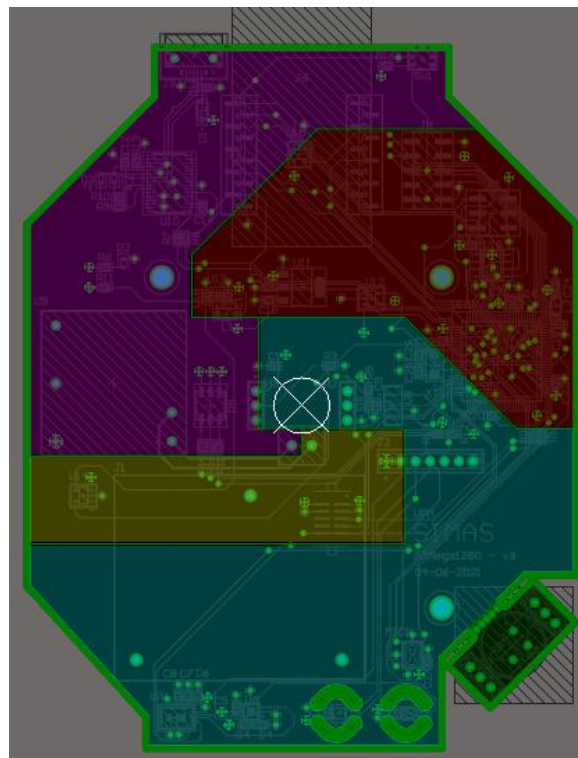


Figura 39. Esquema de colores para los diferentes voltajes

La otra opción son las capas de señales que llevan pistas en ellas, aunque también se puede recurrir a los *polygon pours*. Un *polygon pour* es un elemento que permite combinar la ventaja de una capa plano con una capa de señales. Se establece un plano que actúa como una capa de cobre que tiene asignada una señal determinada, pero este plano tiene pistas aisladas de él mismo que llevan otras señales diferentes.

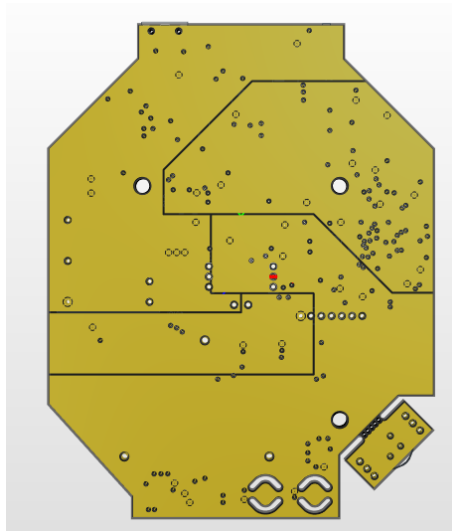


Figura 40. Vista 3D de los planos de cobre para los diferentes voltajes

Las *PCBs* pueden ser de 2, 4 o 6 capas normalmente. Disponer de más capas permite tener más libertad en el diseño y distribuir mejor las pistas. En diseños que vayan a tener un gran número de conexiones es recomendable introducir más capas. Por otro lado, al aumentar el número de capas, también aumenta el grosor y el precio de la placa.

El prototipo de *SIMAS* posee cuatro capas, las cuales se dividen en dos capas internas tipo plano para los planos de masa y de alimentación con distintos voltajes, y dos capas externas tipo señal para las pistas. El espesor de la placa es, por tanto, de 1.6 mm.

### 2.7.2. Recomendaciones

Una vez establecidas las capas de la *PCB*, se procede a *routear*. La condición fundamental es que las pistas de diferentes señales no se pueden cruzar, ya que se crearían cortocircuitos. Teniendo esto en cuenta, las posibilidades en el diseño son infinitas y responden muchas veces a gustos personales. No obstante, hay algunas recomendaciones de diseño que sí que conviene seguir, y que constituyen buenas prácticas.

Una recomendación muy importante es la de agrupar las pistas. Antes de tirar pistas de un pin a otro y crear una maraña de conexiones, es conveniente ver si las pistas de una zona tienen, más o menos, el mismo origen y destino. Si es así, se pueden agrupar las pistas creando una especie de bus de pistas que permite obtener un diseño más limpio, ordenado y que facilita la comprensión.

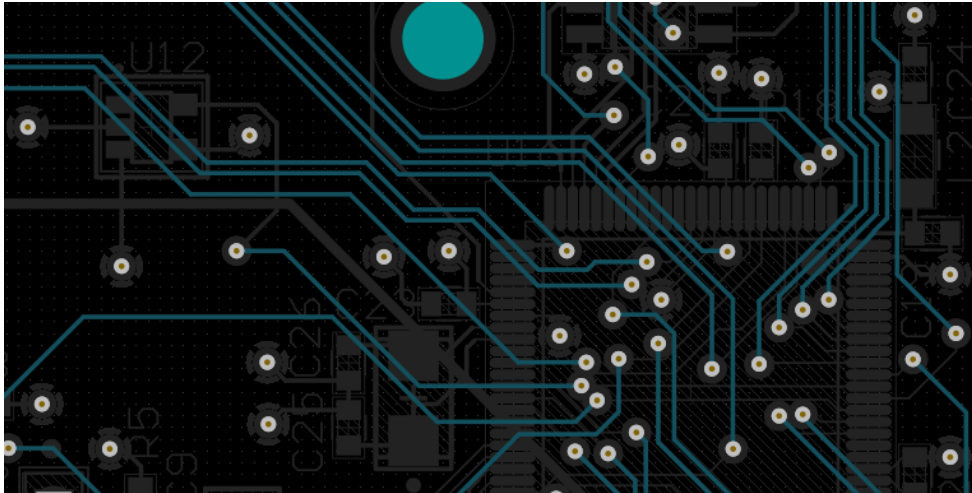


Figura 41. Pistas en paralelo en la capa inferior de la PCB

Otra buena práctica consiste en intentar establecer direcciones comunes a las pistas de una misma capa. Esto es muy beneficioso, ya que, si todas las pistas de una misma capa son verticales u horizontales, es mucho más difícil que se corten entre ellas. Esta recomendación tiene que ir relacionada con el *layout* de los componentes, pues muchas veces la propia localización de los pines a conectar supone un impedimento a la hora de establecer una dirección general en una capa.

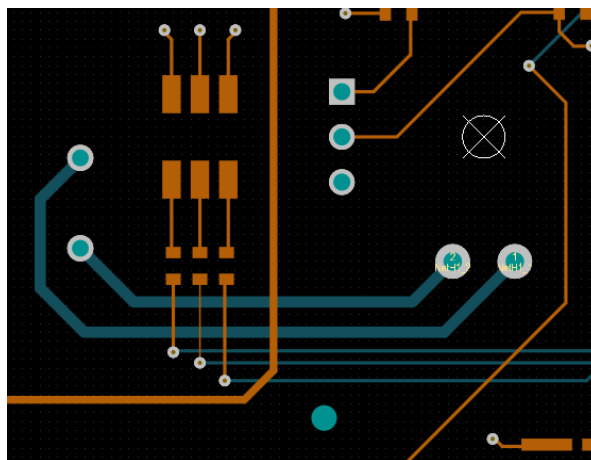


Figura 42. Pistas y vías entrelazadas

La tercera recomendación a veces viene exigida por el propio diseño, y es el uso de las vías. Como se ha descrito anteriormente, las vías permiten conectar señales entre diferentes capas. Esto hace que se puede tirar una pista en una capa (capa naranja) y, si es necesario, continuar por otra capa (capa azul) para evitar cortar otras pistas en su misma capa. Utilizar vías ayuda a obtener un diseño con pistas de menor longitud y más ordenado.

El consejo final es utilizar los diferentes grosores de pistas. Las reglas de diseño establecen un grosor mínimo, un grosor máximo y un grosor medio. Variar entre estos anchos, aparte de ser necesario en algunos casos, permite tirar pistas en sitios en los que con un solo grosor no se podría y así tener un poco más de libertad en el diseño. En algunas ocasiones, se debe variar el ancho de las pistas sobre todo al conectarlas a los *pads*. Un *pad* pequeño con una pista muy grande puede provocar problemas a la hora de soldar. Es recomendable que la pista sea menos gruesa que el *pad* al que se va a conectar. Por el contrario, hay situaciones en las que conviene aumentar el grosor de la pista. Estas situaciones se dan cuando la corriente que va a circular por la pista es considerable.

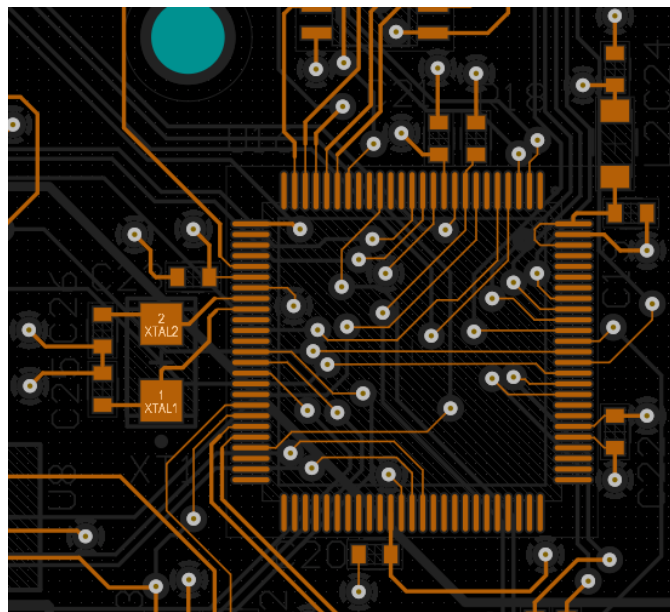


Figura 43. Diferentes tamaños de pistas y vías en el microprocesador

### 2.8. Design rule check

Cuando se ha terminado el diseño de la placa, puede haber errores que no han sido señalizados por el programa en tiempo real. Para asegurar que se han respetado las reglas de diseño y que no hay errores graves como colisiones entre componentes o conexiones al aire, se ha de ejecutar el *design rule check*. Esta herramienta hace las veces de compilador y comprueba que el diseño esté correcto mientras resalta en una lista los errores.

El objetivo siempre debe ser el de obtener cero errores en *el design rule check*, pero en algunas ocasiones basta con conocer los errores que figuran y que el diseñador interprete cuáles son errores aceptables o que no repercuten en la funcionalidad de la placa. Por ejemplo, para el programa, una conexión no realizada cuenta igual que un

borde de una inscripción de una resistencia que colisione con otra inscripción. En la realidad, mientras que el primer error puede dejar inservible la placa, el otro sólo afectaría a nivel visual. Por todo eso es importante controlar los errores *del design rule check* y así poder solventar los errores graves en el diseño.



Figura 44. Recorte del Design Rule Check

En el informe de errores del nuevo prototipo de SIMAS figuran siete errores, los cuales se deben a líneas de la capa *Overlay* (capa de información) que sobresalen de la placa. Estos errores no suponen un peligro para la funcionalidad final de la placa, pero a la hora de la fabricar la placa, dichas líneas no se verán.

Es importante mencionar que la utilidad del *design rule check* depende del diseñador, ya que este se basa en las reglas de diseño establecidas por el mismo y, por consiguiente, cuanto más restrictivas sean las reglas, más seguro y fiable será *el design rule check*.

## 2.9. Pasos finales

### 2.9.1. Fabricación de la placa y solicitud de componentes

Cuando ya se ha terminado el diseño y se han revisado tanto *el design rule check* como todo el resto de los documentos, se deben pedir los componentes y mandar los documentos de la placa para su fabricación.

Para pedir la placa se necesitan generar unos documentos nuevos llamados ficheros *Gerber*. Cada uno de estos ficheros incluye una capa de diseño de la *PCB*. Por ejemplo, un fichero es el de la capa superficial, otro es el de una capa interior que sea un plano de tierra y otro fichero es el de las inscripciones superficiales. En conjunto, constituyen la placa, aunque no es necesario generar los ficheros de todas las capas, pues solamente las capas más importantes son necesarias.

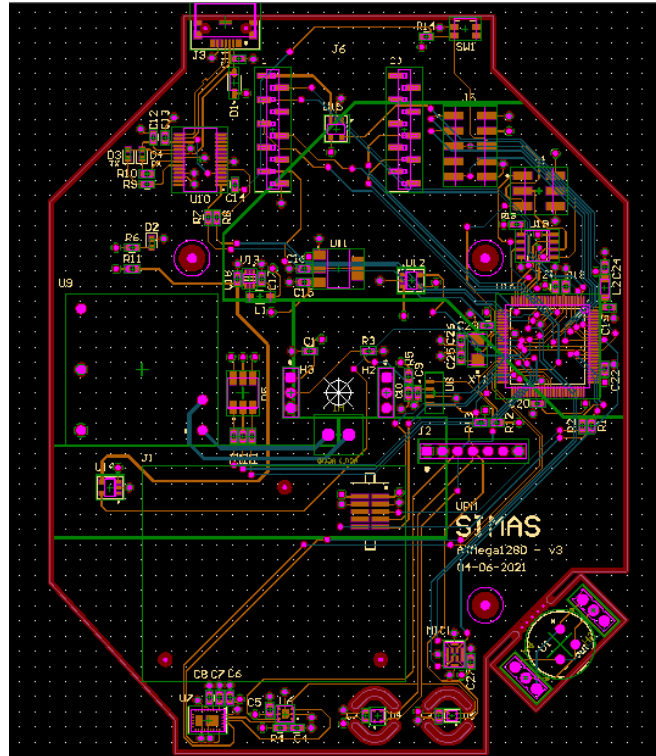


Figura 45. Vista preliminar de los Gerber Files

Es muy importante añadir una capa en el diseño en la que figure la línea de contorno (*Board Outline*) de la placa para luego generar su fichero Gerber. Sin ella, el fabricante podría llegar a modificar por error las dimensiones de la placa según considere con el resto de los documentos enviados.

También es necesario el fichero de agujeros (*NC Drill Files*), el cual se genera en un apartado diferente. Este fichero es un *txt* que indica las coordenadas para la máquina que realiza los taladros en la placa.

```
M48
;Layer_Color=9474304
;FILE_FORMAT=4:4
METRIC,LZ
;TYPE=PLATED
T1F00S00C0.3000
T2F00S00C0.7620
T3F00S00C1.0000
T4F00S00C1.0200
T5F00S00C1.0201
T6F00S00C1.1000
T7F00S00C1.5000
;TYPE=NON_PLATED
T8F00S00C0.8000
T9F00S00C0.8500
T10F00S00C3.5000
%
T01
X0013275Y-005475
Y-005325
X0016575Y-0045675
Y-0043675
Y-0041425
```

*Figura 46. Fichero txt con la secuencia de operaciones para el mecanizado*

### 2.9.2. Soldadura y testeo

Al recibir los componentes, se procede a soldarlos en la placa ya sea manualmente uno a uno, en un horno de soldadura o mediante su envío a un centro especializado de soldadura automatizado.

Una vez la placa tiene todos sus componentes soldados se puede iniciar su testeo. A la hora de testear la placa se debe comprobar primero que la alimentación funciona (tanto la alimentación de pared como la *USB*) y más tarde se comprobará que la comunicación del módulo *Zigbee* con el *gateway* a través de la antena es correcta. Cuando se hayan comprobado los anteriores apartados se podrá pasar a la fase de testeo de nuevos sensores. Para ello, se deberá instalar el módulo sensor en las aulas y se estudiarán tanto la consistencia de las mediciones como si sus valores son coherentes y esperados.

Una de las fases finales del testeo, teniendo en cuenta que lo anterior funcione debidamente, es la de desplegar la red de nodos en todas las aulas para comprobar si la cobertura que ofrece el *gateway* y el rango de las antenas es suficiente para cubrir la escuela entera o si, por el contrario, un *gateway* sólo puede recibir comunicaciones en una sola planta.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Primera versión

Los primeros resultados de este proyecto se obtuvieron cuando se fabricó una versión preliminar de los nodos sensores. Esta versión pretendía ser un paso intermedio entre el primer prototipo y el prototipo final enfocado a la puesta en servicio. El diseño presentaba un esquema de alimentación diferente al del prototipo final, pues contaba con un conector de alimentación cilíndrico el cual estaría conectado a un transformador externo de enchufe habitual. La intención era la de ser utilizado para comprobar la implementación de los nuevos sensores y su comportamiento con el nuevo microprocesador de *Atmel*.

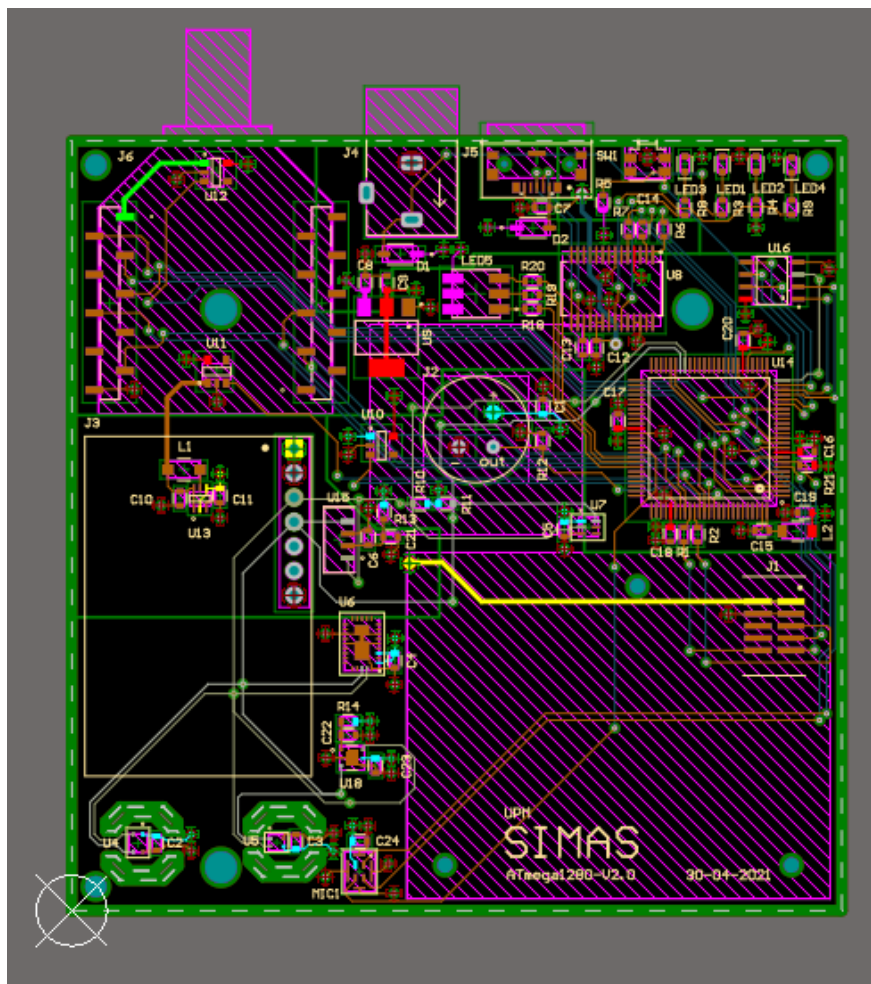


Figura 47. Primera versión del segundo prototipo

La placa no se pudo llegar a testear ya que había dos errores críticos en ella, puesto que no se habían incluido componentes clave como son el programador *ISP* y *JTAG* para el chip microprocesador. Tampoco había un cristal oscilador externo, lo que habría obligado a utilizar el oscilador interno de 8 MHz del microprocesador.

Este diseño también presentaba otra complicación causada por la huella de los conectores del módulo de comunicación *Zigbee*. Estos conectores consisten en una tira de 10 pines con *pads* situados escalonadamente de arriba abajo alternándose en cada posición entre izquierda y derecha. El problema aparece cuando hay dos modelos de conectores que presentan configuraciones invertidas, pero sólo uno de ellos se encuentra en stock. La huella incluida en este diseño era la del conector que no se encontraba en stock, por lo que no se podían introducir los conectores.

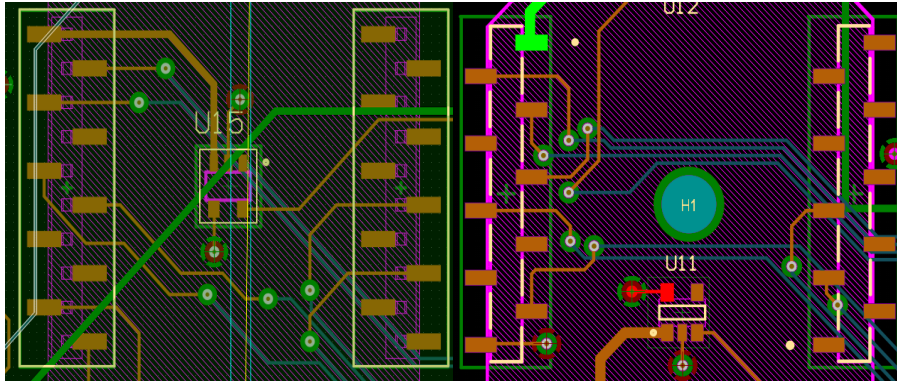


Figura 48. Diferencias entre el conector del módulo Zigbee

La placa únicamente sirvió, por tanto, para corregir errores de cara al diseño final y para adquirir una valiosa experiencia en el posterior diseño.

### 3.2. Segunda versión

La segunda versión del prototipo es la realizada en los meses de mayo y junio (Figura 49). Esta versión tenía las funciones de corregir los errores de la primera y presentar un diseño que encajase en la carcasa hexagonal.

Lamentablemente, la placa no ha podido ni ser montada ni testada en la fecha de redacción de esta memoria. Una de las razones que ha llevado a esta situación es la dificultad añadida que ha supuesto la pandemia COVID-19 a la hora de realizar los pedidos de componentes. Estos pedidos, cuando se han podido realizar con éxito, se han demorado más de lo esperado y en algunas ocasiones, el stock de los componentes directamente desaparecía de una semana a otra.

Es importante recalcar la importancia del stock de los componentes, ya que cuando se selecciona un componente tras haber estudiado su hoja de datos, se ha diseñado su símbolo en *Altium* y se ha integrado y *routeado* en la *PCB*, que no se encuentre en stock (o que no vaya a haberlo en meses) supone una gran pérdida de tiempo debido a que se debe repetir el proceso con un componente alternativo.

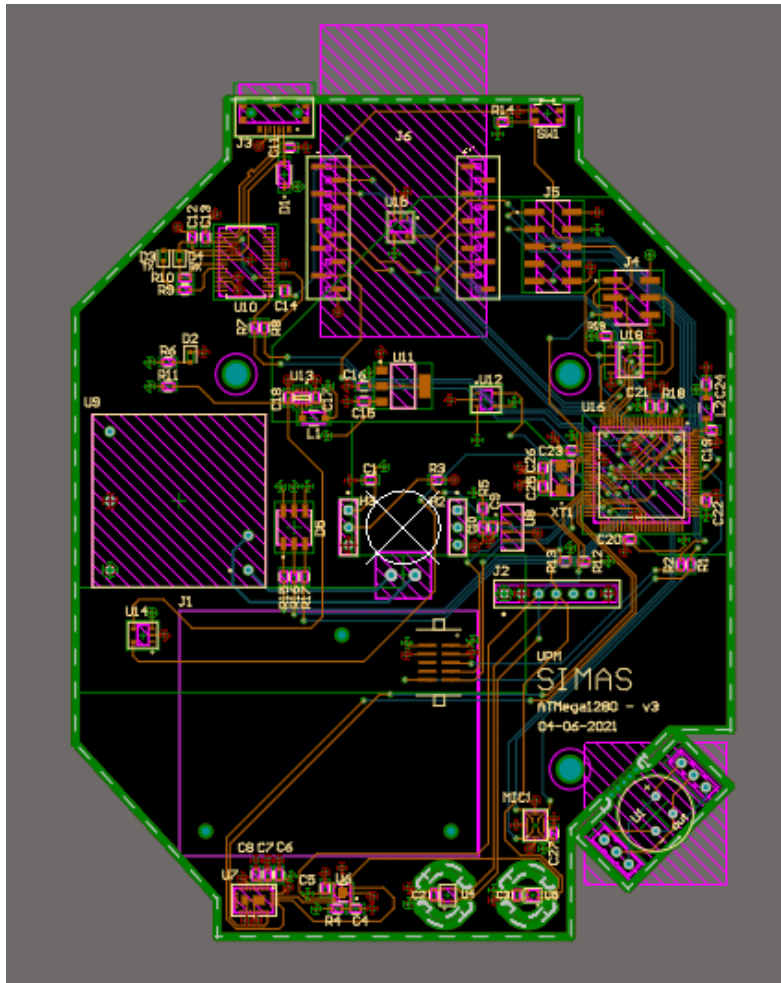


Figura 49. Segunda versión del segundo prototipo

El motivo fundamental que ha supuesto un considerable retraso a la hora de obtener los componentes para el nodo es el propio acuerdo marco que tiene la UPM con el proveedor *RS Components* y los trámites administrativos que requieren las solicitudes de compra. Este acuerdo marco se establece para controlar los pedidos y que no se incurra en alguna impropiedad, pero retrasa los pedidos por dos razones.

La primera es que *RS Components* no posee una página web que facilite la búsqueda de componentes en comparación a otros proveedores de la competencia. Disponer de una página en la que se pueda realizar un buen filtrado según las categorías de interés acelera mucho la búsqueda de componentes.

La segunda razón se da cuando el componente estrictamente necesario para el prototipo no se encuentra disponible en *RS Components*, pero sí que está disponible en otro proveedor. En ese momento se debe formular una solicitud en la que se deben incluir tres opciones diferentes de compra para el mismo componente, de las que se

debe elegir la de menor precio. Este proceso ralentiza las ya de por sí complicadas y lentas solicitudes de compra.

Se espera que la versión no testada permita obtener datos e información con respecto a sus nuevos sensores y componentes de cara a seguir mejorando el prototipo y, en un caso ideal, que sirva como versión de producción para poder realizar un despliegue mayor de nodos.

### **3.3. Futuras versiones**

Al encontrarse el proyecto aún en una fase de prototipado, se pretende seguir mejorando y adaptando el nodo sensor en próximas versiones. El objetivo más inmediato es el de sustituir algunos componentes como el microprocesador o el módulo *Zigbee* por modelos más actuales y económicos. También se planea introducir la funcionalidad de medición de la ocupación para posibilitar la gestión de espacios.

La medición de ocupación es una funcionalidad ambiciosa y que puede conseguirse por varias vías. El objetivo es permitir contabilizar de alguna forma el nivel de ocupación de las aulas para así poder asignar los espacios de acuerdo con su utilización real. Las formas más habituales hoy en día para conseguir este objetivo son la utilización de cámaras térmicas, de vigilancia con inteligencia artificial o programables para detectar cuerpos 3D. El problema se encuentra en el elevado precio de estos dispositivos.

Por otro lado, se podría optar por soluciones más ingeniosas y que permitan realizar la misma función. Una que es utilizada por algunos espacios profesionales es la medida de la densidad en el área. Esto se consigue con una 3D situada en el techo de la habitación en cuestión. La 3D registra los movimientos y envía los datos a un servidor que, mediante un software, sitúa en un espacio 3D los movimientos y los cuerpos tridimensionales situados en el espacio en tiempo real. Este proceso es similar al de tomar una foto de una habitación vacía y posteriormente tomar fotos para ver las diferencias, solo que en tres dimensiones. El software no contabiliza personas, pero sí que da una idea de la ocupación del espacio. Las ventajas son la disminución en el precio en comparación con las cámaras y el anonimato que permite, el inconveniente es la complejidad de desarrollo del software (Farah, 2018).

Otras medidas más económicas consisten en colocar sensores infrarrojos en las puertas de los espacios de forma que se establezca un haz que se corte cuando alguien lo cruza. Al final del día se obtendría un número que, al ser dividido por la mitad, daría la cantidad de veces que alguien ha accedido al aula. Además, si se conoce en qué horario un aula debe estar vacía, se podría conocer hora a hora la ocupación de esa aula. Los

inconvenientes vienen dados por la poca precisión de los sensores (dos personas pueden entrar a la vez y se contabilizaría como uno). La única ventaja es el reducido precio.

Uno de los objetivos del proyecto es crear un dispositivo que sea competitivo con los que están actualmente en el mercado. Por ese motivo, en futuras versiones sería conveniente mejorar algún aspecto como la conectividad, los costes (y, por tanto, el precio), el *display*, la portabilidad o la cantidad y fiabilidad de las mediciones.

Para mejorar la conectividad, se podría crear una aplicación que se conecte con el servidor de *Grafana* actual y que de esa forma cualquier persona de la escuela pueda consultar la información de las aulas. Esta mejora además supondría no tener que mejorar el *display* del prototipo, ya que la información se consultaría desde un móvil u ordenador. También se podría optar alternativamente por mostrar individualmente en cada sensor la información del aula, pero esta medida incrementaría el coste unitario de los nodos al tener que invertir en una pantalla o en más leds. Además, al desplegar una red de nodos tiene más sentido poder visualizar la información de toda la red a la vez y no tener así que consultar nodo por nodo.

Los costes del dispositivo se pueden mejorar de varias maneras. La más inmediata y simple se conseguiría al pasar del prototipo a un modelo de producción. De esta forma se abaratarían mucho los costes ya que los pedidos de componentes serían mayores y se ahorraría tanto en gastos de envío a la vez que se haría economía de escala. La segunda forma de abaratar costes es encontrar componentes que realicen las mismas funciones, pero que sean más baratos, ya sea porque son modelos más modernos que los actualmente instalados, o que sean directamente modelos de otras marcas de la competencia con mejores precios. El inconveniente de esta opción es la necesidad de probar los nuevos componentes, lo que supone una inversión adicional.

Por último, para mejorar la portabilidad de los nodos sensores habría que desarrollar un sistema de alimentación secundario basado en baterías. Esta opción presenta el problema del consecuente aumento de tamaño del nodo sensor, el cual ya es considerable. Alternativamente, se podría optar por utilizar cables *USB* o un conector con transformador al igual que un ordenador, pero estas dos opciones limitan las posiciones en las que se podría instalar el nodo sensor a la distancia de los correspondientes cables.

## 4. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

### 4.1. Estructura de descomposición del proyecto (EDP)

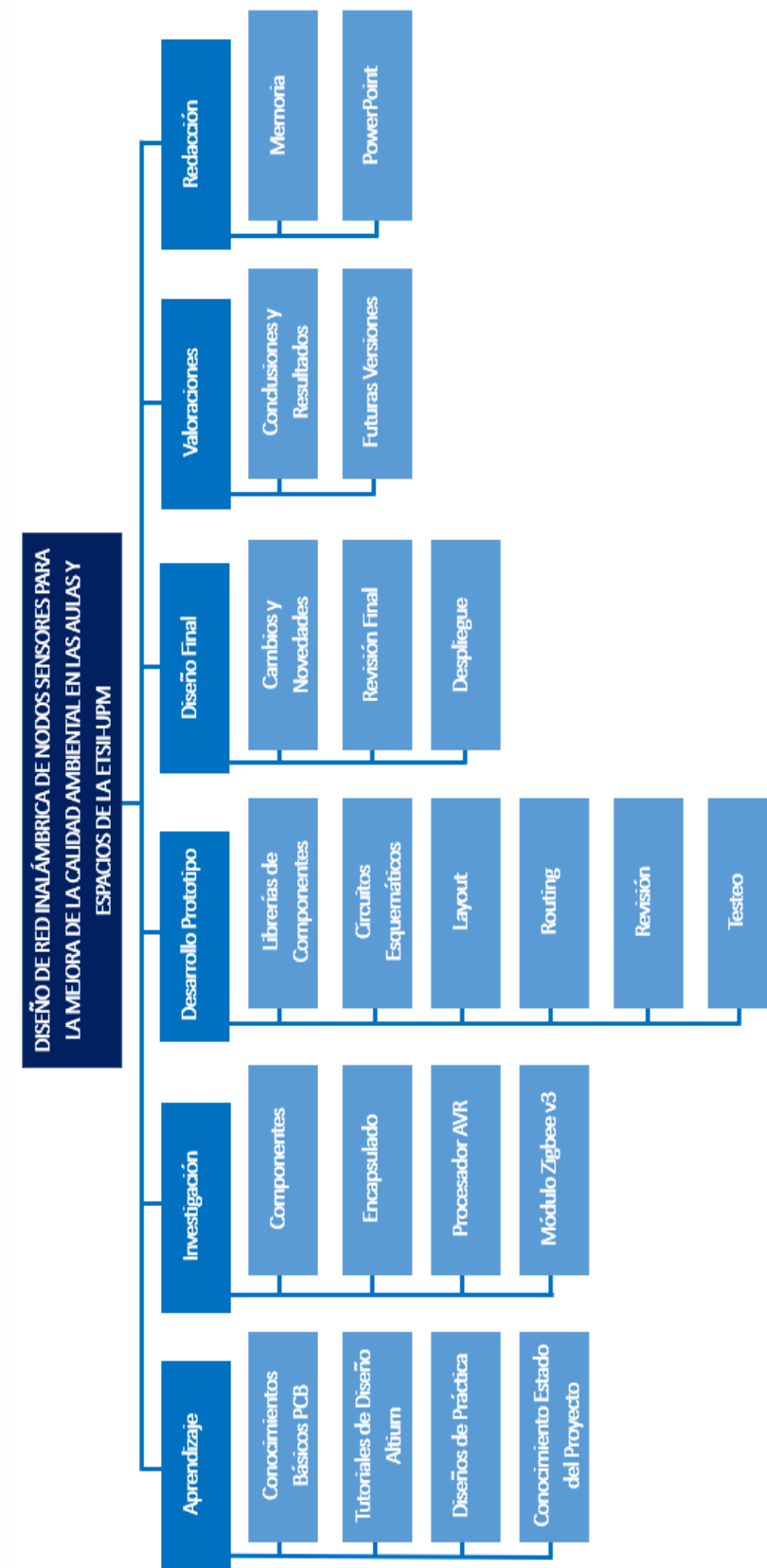


Figura 50. Planificación temporal del proyecto

### 4.2. Diagrama de Gantt

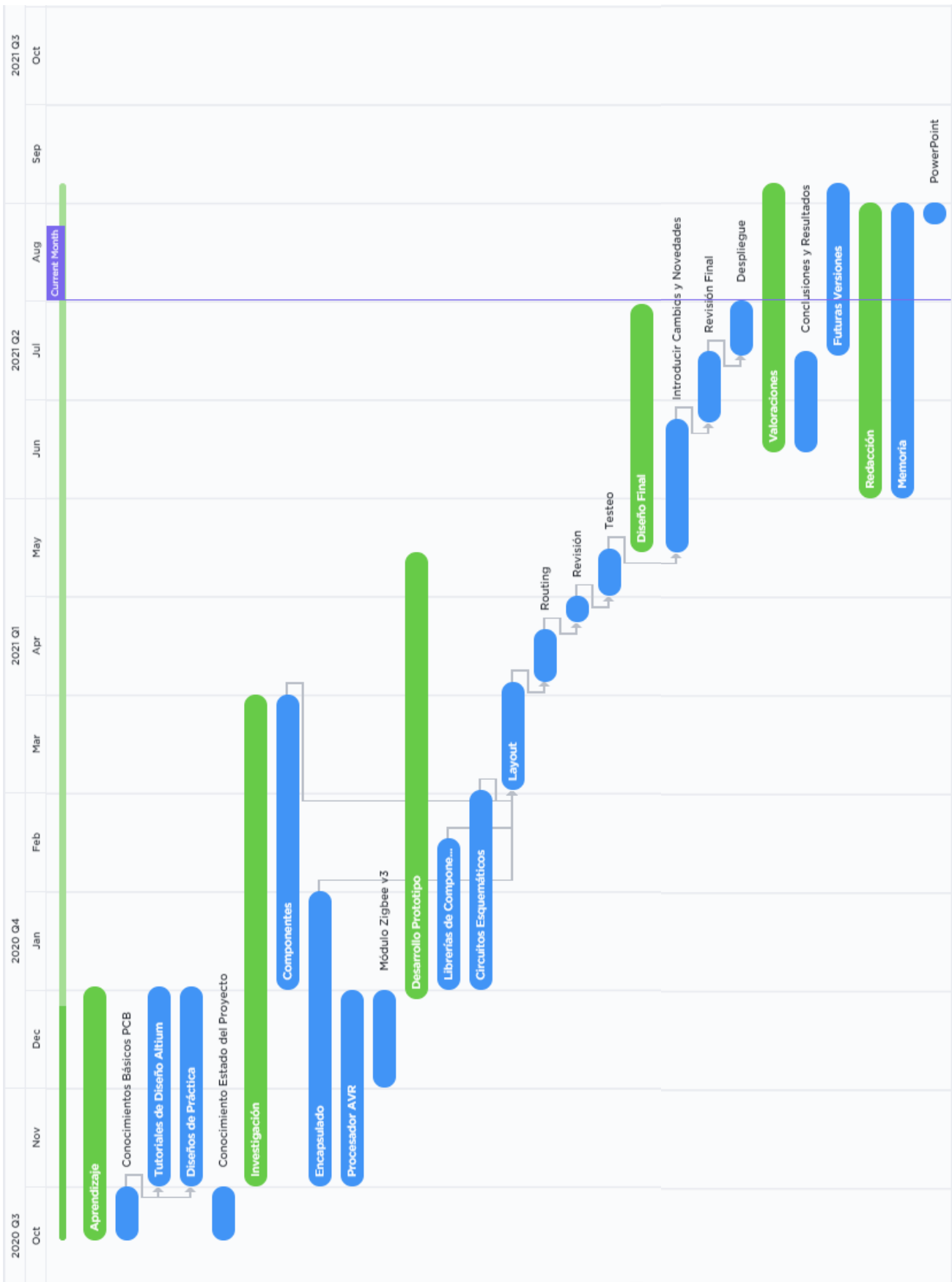


Figura 51. Diagrama de Gantt del proyecto

### 4.3. Presupuesto

Para calcular el presupuesto del proyecto (Tabla 1) se han tenido en cuenta tres factores. Estos son el factor humano, los recursos tangibles y el coste de los componentes que conforman el prototipo y entre los que también se incluyen la propia PCB y la carcasa.

El factor humano se ha contabilizado estimando el salario que correspondería a un trabajador con la cualificación necesaria para realizar las labores de diseño y desarrollo del proyecto. Dicho trabajador debe tener conocimientos de informática y del software de diseño *Altium* a la vez que debe estar formado en electrónica. Por tanto, el salario estimado sería de unos 1.450 € mensuales, lo cual conforma un total de 5.800 € con una duración de cuatro meses. Dicha duración es la duración que habría tenido el proyecto con una jornada completa.

En cuanto a los recursos tangibles, se puede contabilizar la licencia de software *Altium*, la cual supone un coste de 300 €/mes, o sea 1200 € en cuatro meses. Otro de los recursos tangibles a contabilizar es el ordenador utilizado, en este caso un portátil valorado en 500 € capaz de ejecutar el software *Altium*.

Por último, los costes de los componentes se han estimado con los precios unitarios obtenidos de las correspondientes páginas web de los proveedores y multiplicando para el número de nodos obtenidos. Con este cálculo no se incluyen los gastos de envío, aunque en algunas ocasiones estos son gratuitos al superar cierto valor en el pedido. También se ha de tener en cuenta que al ser los precios de los componentes precios unitarios, no representan el gasto real al hacer un pedido de un número de componentes mayor. El gasto de componentes por nodo es de unos 204 €.

El coste estimado de un nodo sensor prototipo es de unos 240 € al incluir la PCB y la caja. Como se solicitaron componentes para crear 15 prototipos, el coste total sería de 3600 €.

CONCEPTO	VALOR	TOTAL
<b>Trabajador</b>	1450 €/mes	5.800 €
<b>Licencia <i>Altium</i></b>	300 €/mes	1.200 €
<b>Ordenador Portátil</b>	500€	500€
<b>Componentes</b>	204 €/nodo	3060 €
<b>Carcasa</b>	20 €/nodo	300 €
<b>PCB</b>	15 €/nodo	225 €
<b>Total</b>		11085 €

Tabla 1. Presupuesto del proyecto

## 5. CONCLUSIONES

El éxito del proyecto y, en parte, del trabajo del fin de grado se evalúa con el cumplimiento de los objetivos marcados en primera instancia. Algunos de estos objetivos no han podido ser evaluados hasta la fecha como pueden ser el comportamiento de los nuevos sensores, el funcionamiento del nuevo sistema de alimentación o la sustitución de la placa *Arduino* por el *ATmega1280*. Sin embargo, aunque finalmente no obtengan los resultados esperados, el trabajo realizado en cada uno de esos apartados supone un gran avance en sí mismo, ya que proveerán información muy valiosa para el desarrollo posterior.

Otros objetivos como la integración de la *PCB* en una caja sí que se han podido cumplir, lo que facilitará los diseños futuros aportando una dirección y una base más sólida sobre la que trabajar.

Por el contrario, otros objetivos secundarios como el desarrollo del circuito *SPL* o la sustitución del *ATmega1280* por el *AVR* no han resultado tan satisfactorios como se esperaba, pero se han aportado los datos y las justificaciones correspondientes en la toma de decisiones que han llevado a esa resolución.

De cualquier forma, los dos objetivos principales de este Trabajo de Fin de Grado sí que se han cumplido satisfactoriamente. Se ha desarrollado un nuevo hardware para los nodos sensores respondiendo a criterios de coste y con un carácter más enfocado a su despliegue, a la vez que se ha elaborado una memoria que puede actuar a modo de guía tanto para el desarrollo de futuros prototipos como para la iniciación en el programa de diseño de *Altium*. Por estos motivos, se concluye que, en el marco de lo posible, se han conseguido alcanzar los objetivos del proyecto.

## 6. ANEXOS

SENSORES	CONSUMO (MAX)	CONSUMO STANDBY
<b>ATmega 1280</b>	14 mA	< 1 $\mu$ A
<b>Flash Memory</b>	30 mA	30 $\mu$ A
<b>FTDI</b>	15 mA	15 mA
<b>Honeywell</b>	80 mA	20 mA
<b>LED RGB</b>	50 mA	-
<b>Micrófono</b>	710 $\mu$ A	275 $\mu$ A
<b>Panasonic PIR</b>	170 $\mu$ A	170 $\mu$ A
<b>QGS KEMET</b>	22 $\mu$ A	3.5 $\mu$ A
<b>SCD30</b>	75 mA	19 mA
<b>SGP40</b>	3 mA	105 mA
<b>SHT40</b>	350 $\mu$ A	2.3 $\mu$ A
<b>SHTC3</b>	900 $\mu$ A	4.9 $\mu$ A
<b>VEML7700</b>	2 $\mu$ A	0.5 $\mu$ A
<b>XBEE</b>	45 mA	31 mA
<b>TOTAL</b>	314 mA	85.5 mA
<b>TOTAL SENSORES 3.3V</b>	5 mA	0.5 mA
<b>TOTAL SENSORES 5V</b>	155 mA	39 mA

Tabla 2. Consumos de corriente máximo y en standby

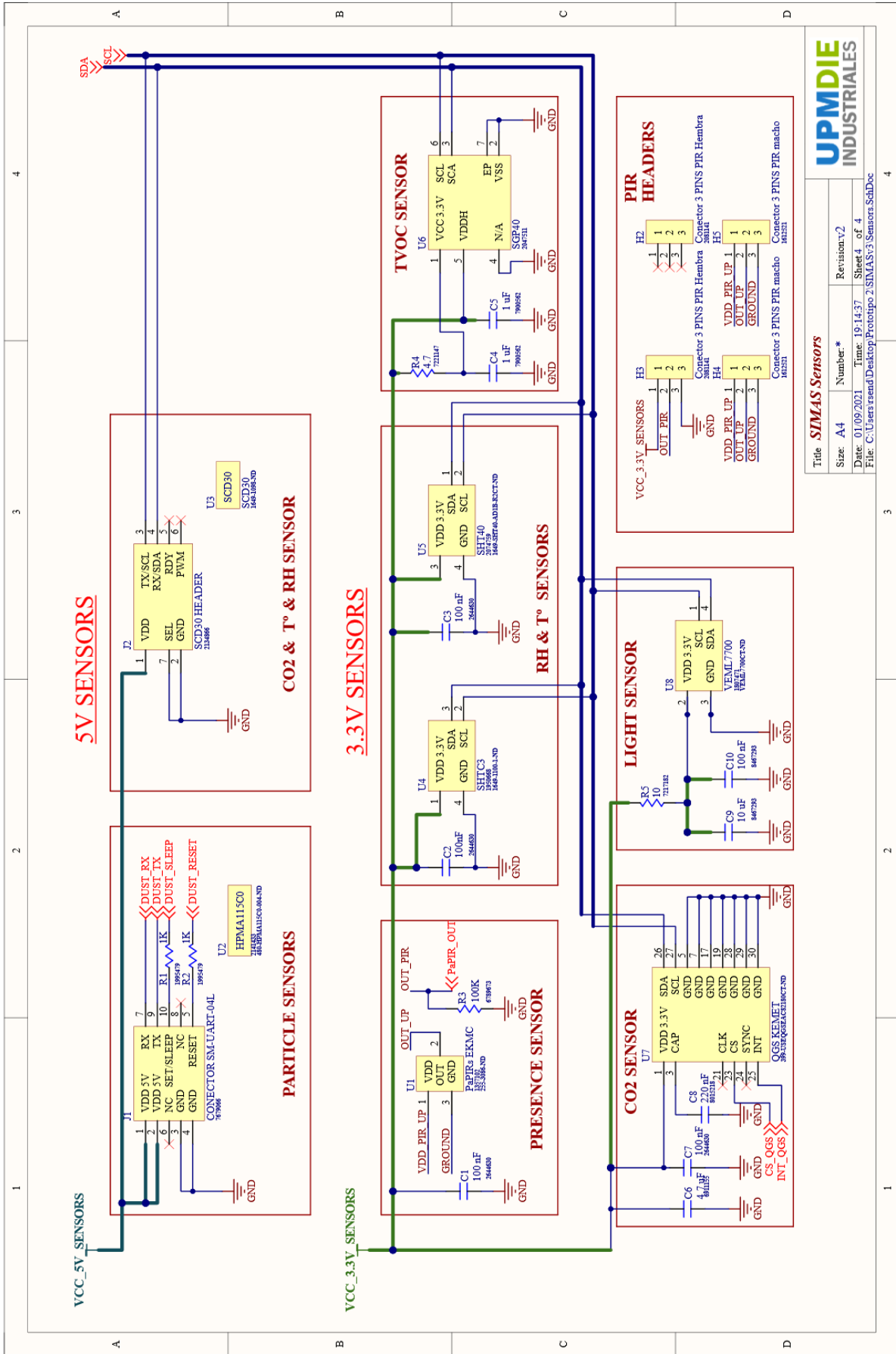
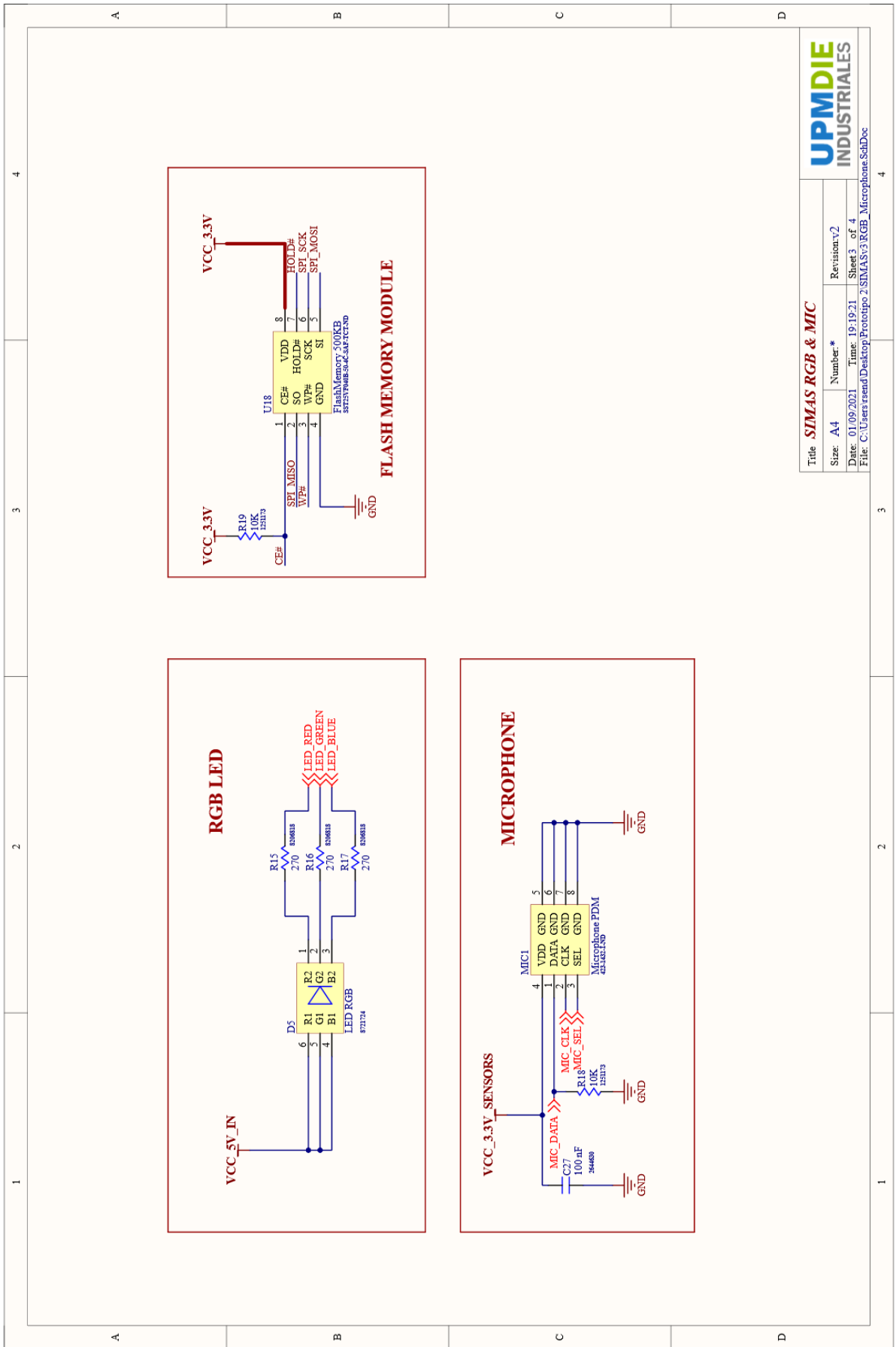
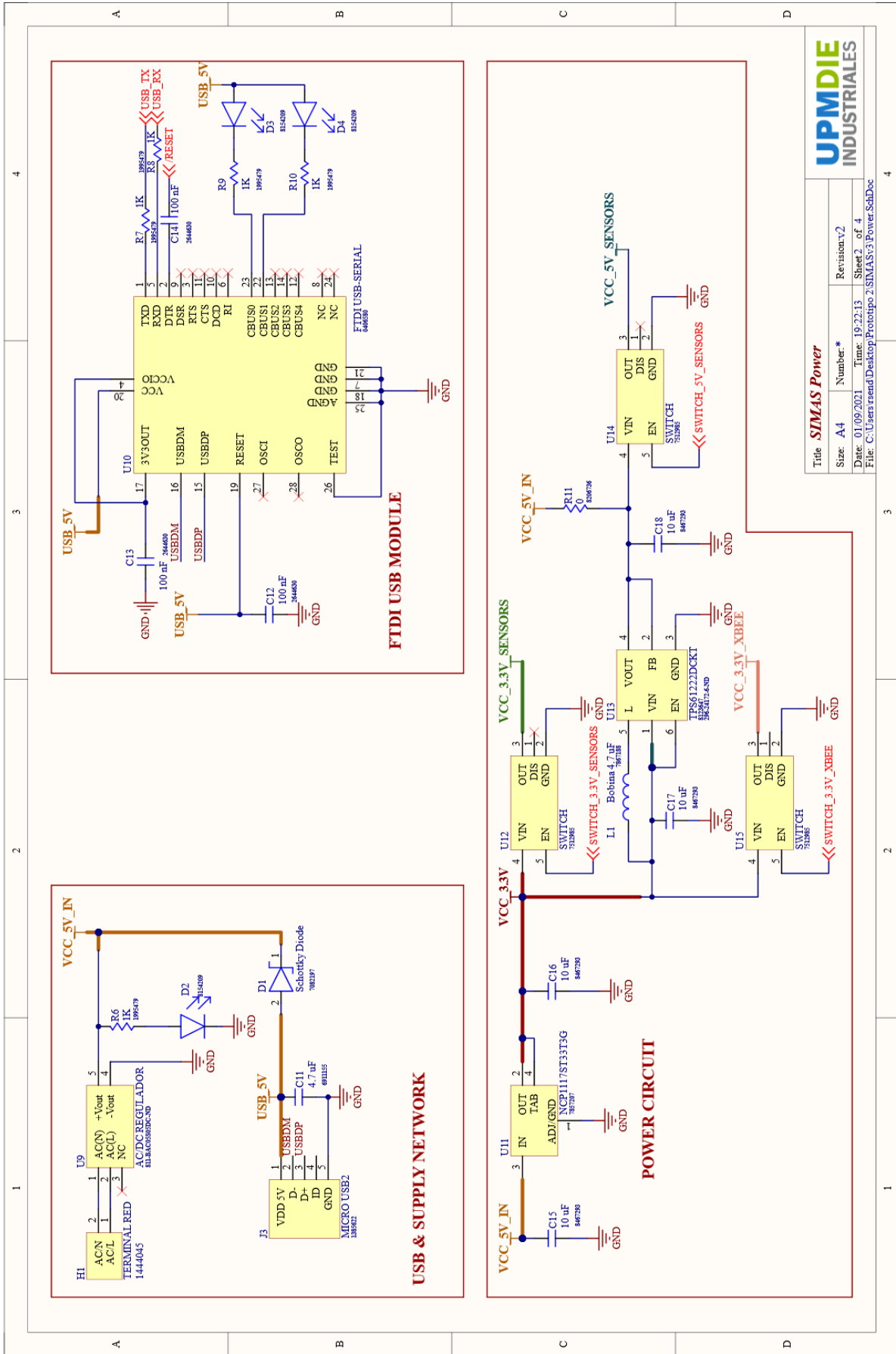


Figura 52. Schematic SIMAS Sensors ANEXO



Title: <b>SIMAS RGB &amp; MIC</b>			
Size: A4	Number: *	Revision: v2	
Date: 01/09/2021	Time: 19:19:21	Sheet 3	of 4
File: C:\Users\rsentad\Desktop\Prototipo 2\SIMAS\3\RGB_Microphone_SchDoc			

Figura 53. Schematic SIMAS RGB & MIC ANEXO



Title <b>SIMAS Power</b>		Revision: * 2
Size: A4	Number: *	Revision: v2
Date: 01/09/2021	Time: 19:22:13	Sheet 2 of 4
File: C:\Users\rend\Desktop\Prototipo 2\SIMAS\3 Power.SchDoc		

Figura 54. Schematic SIMAS Power ANEXO

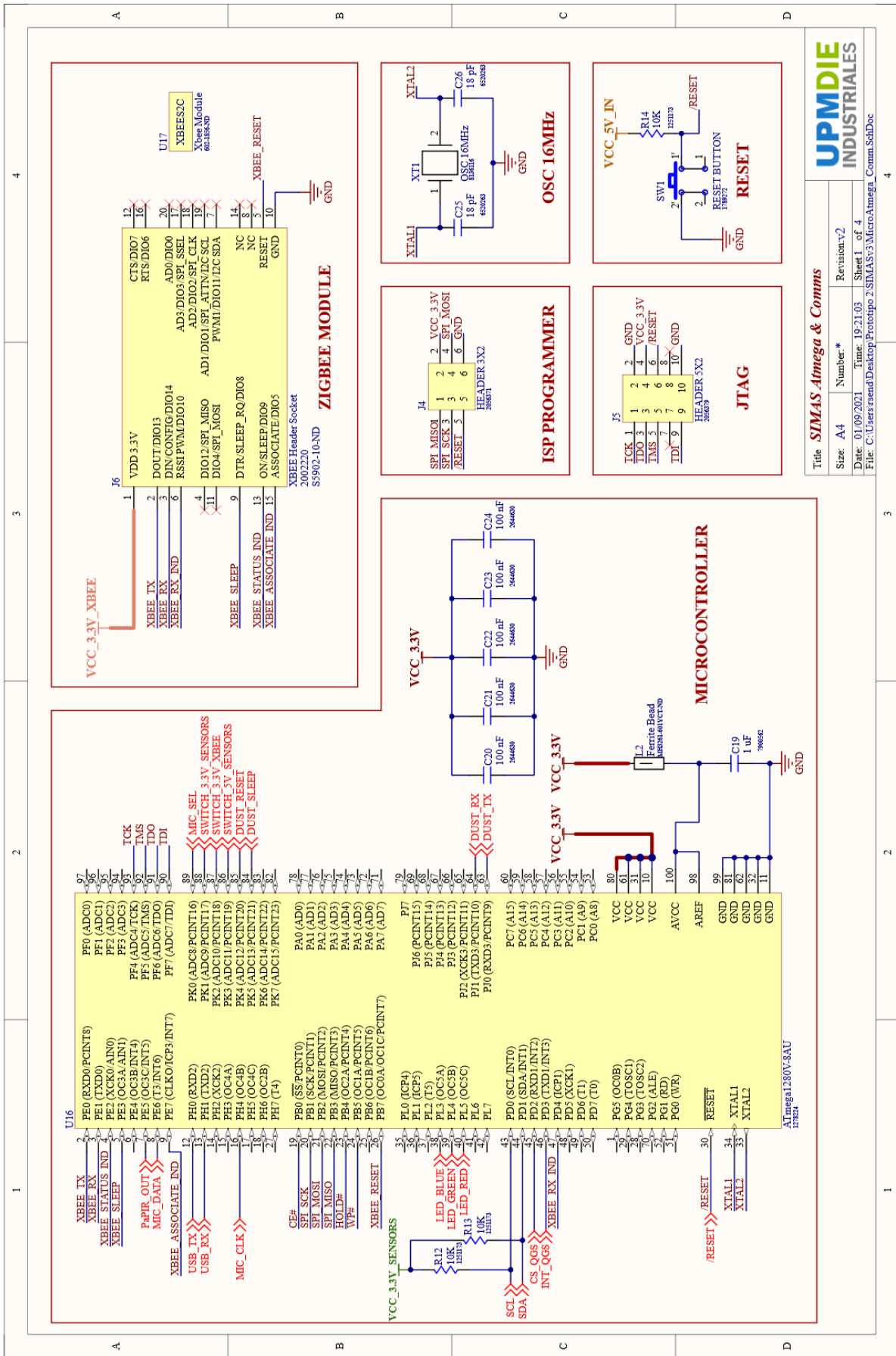


Figura 55. Schematic SIMAS ATmega & Comms ANEXO

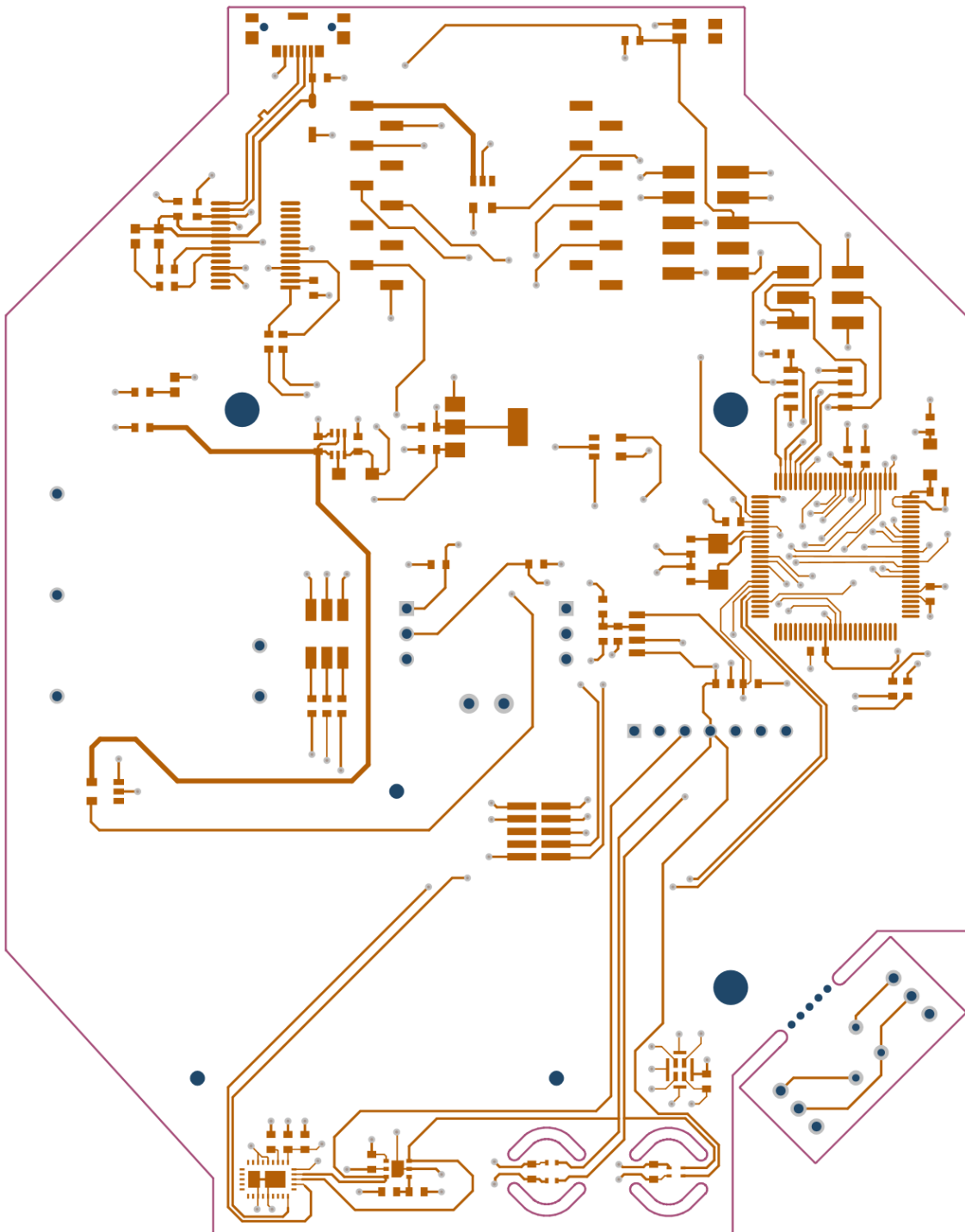


Figura 56. Capa Top Layer

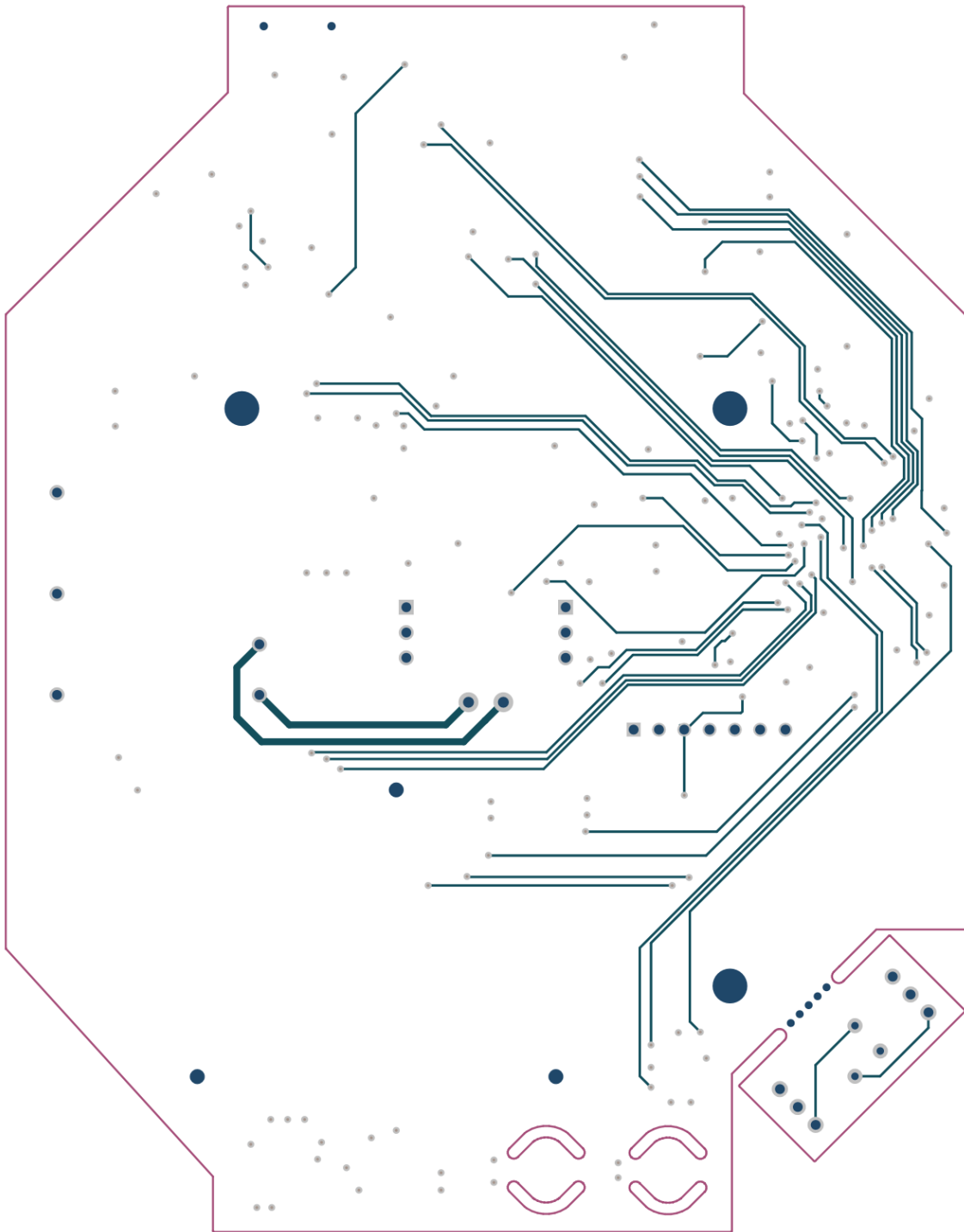


Figura 57. Capa Bottom Layer

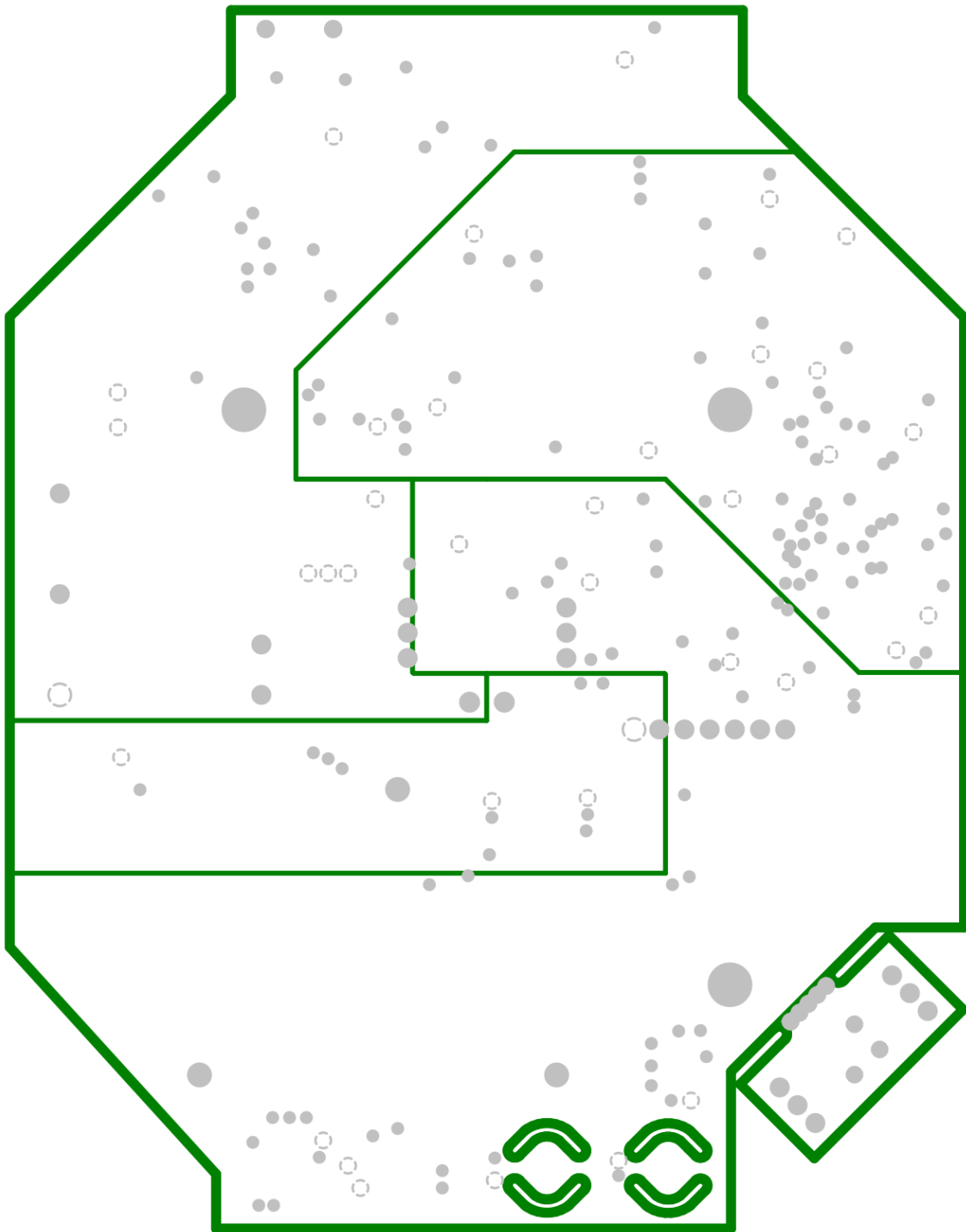


Figura 58. Capa Inner Layer 1 (Planos de alimentación)

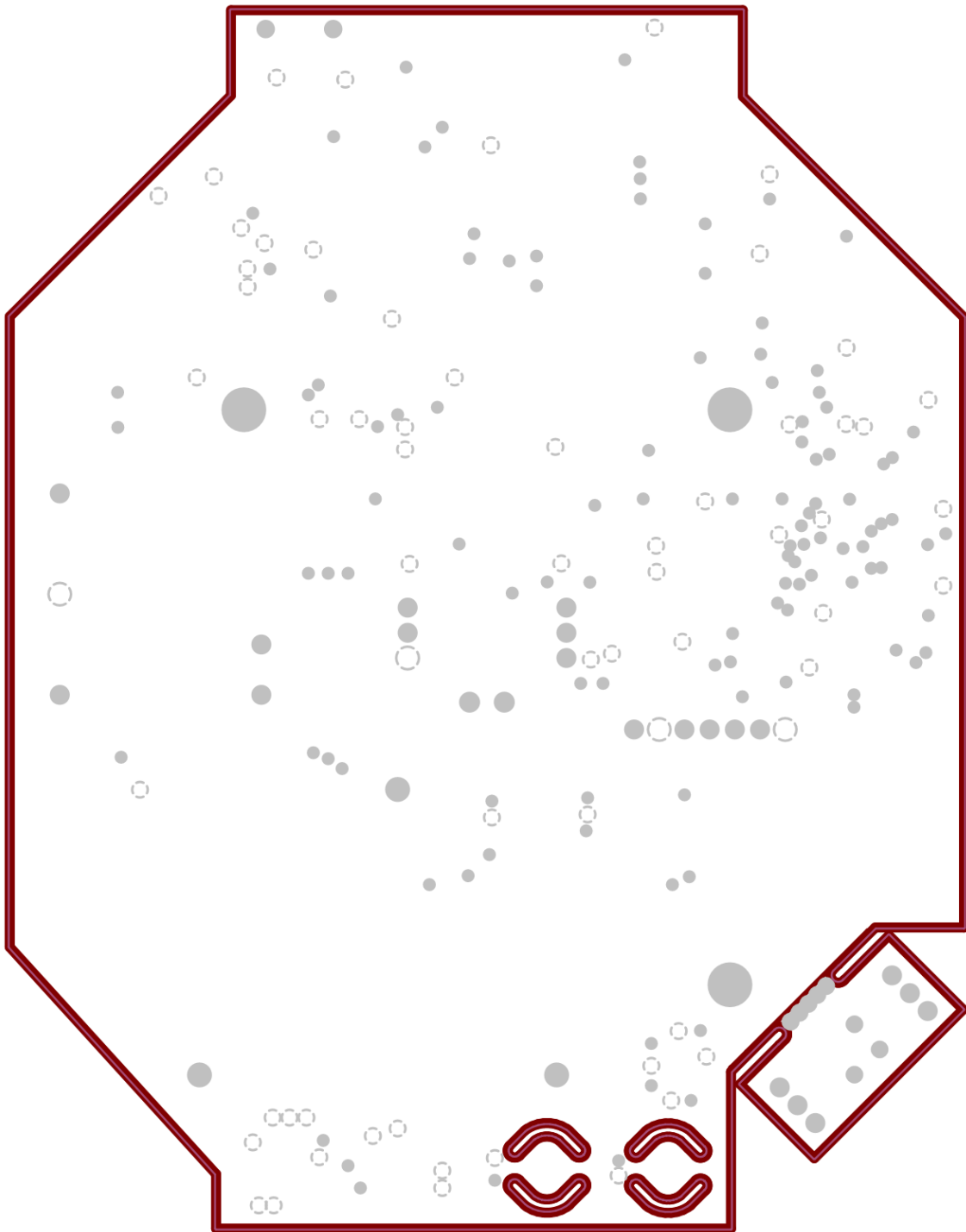


Figura 59. Capa Inner Layer 2 (Plano de masa)

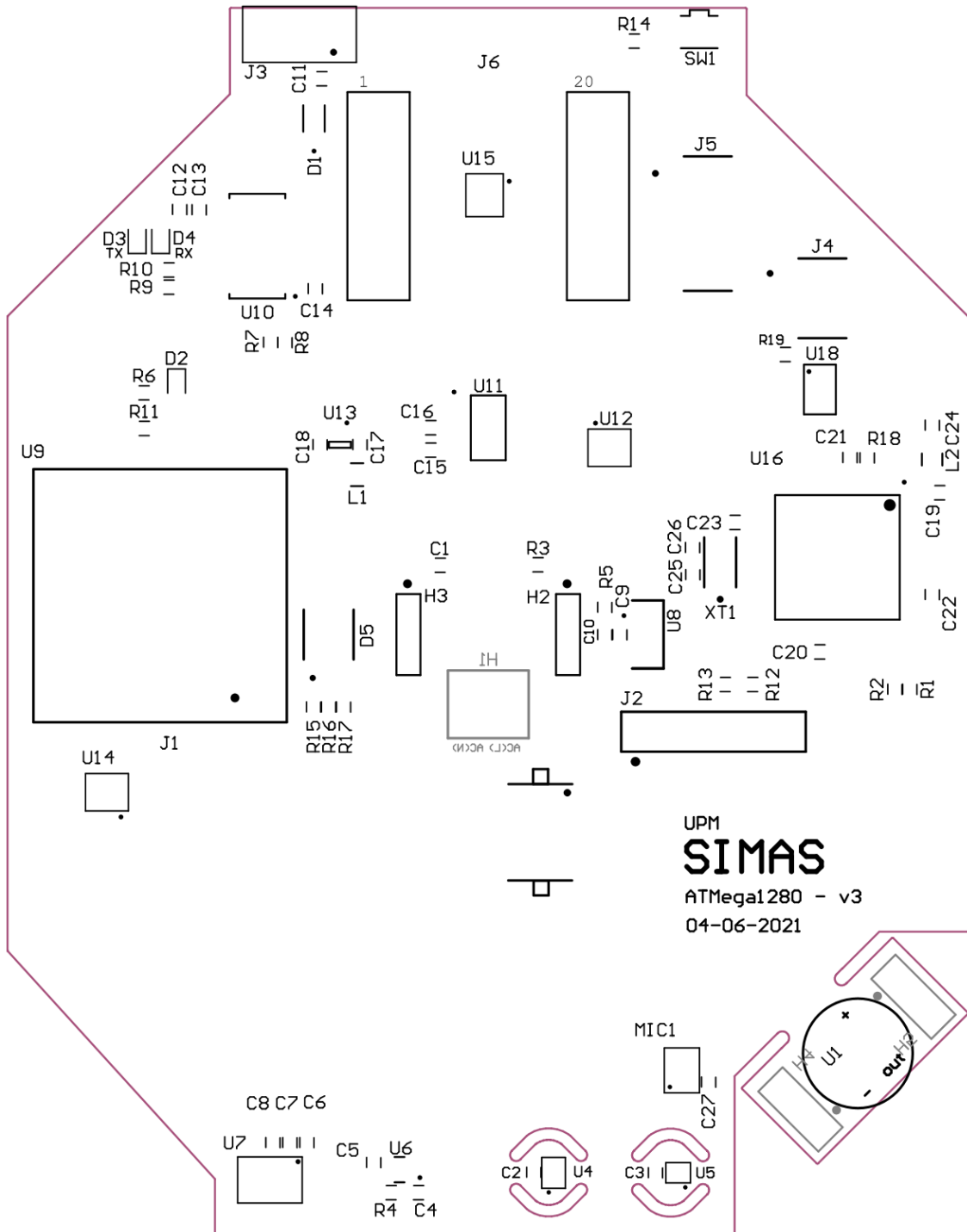


Figura 60. Capa de Serigrafía (Top/Bottom Overlay)

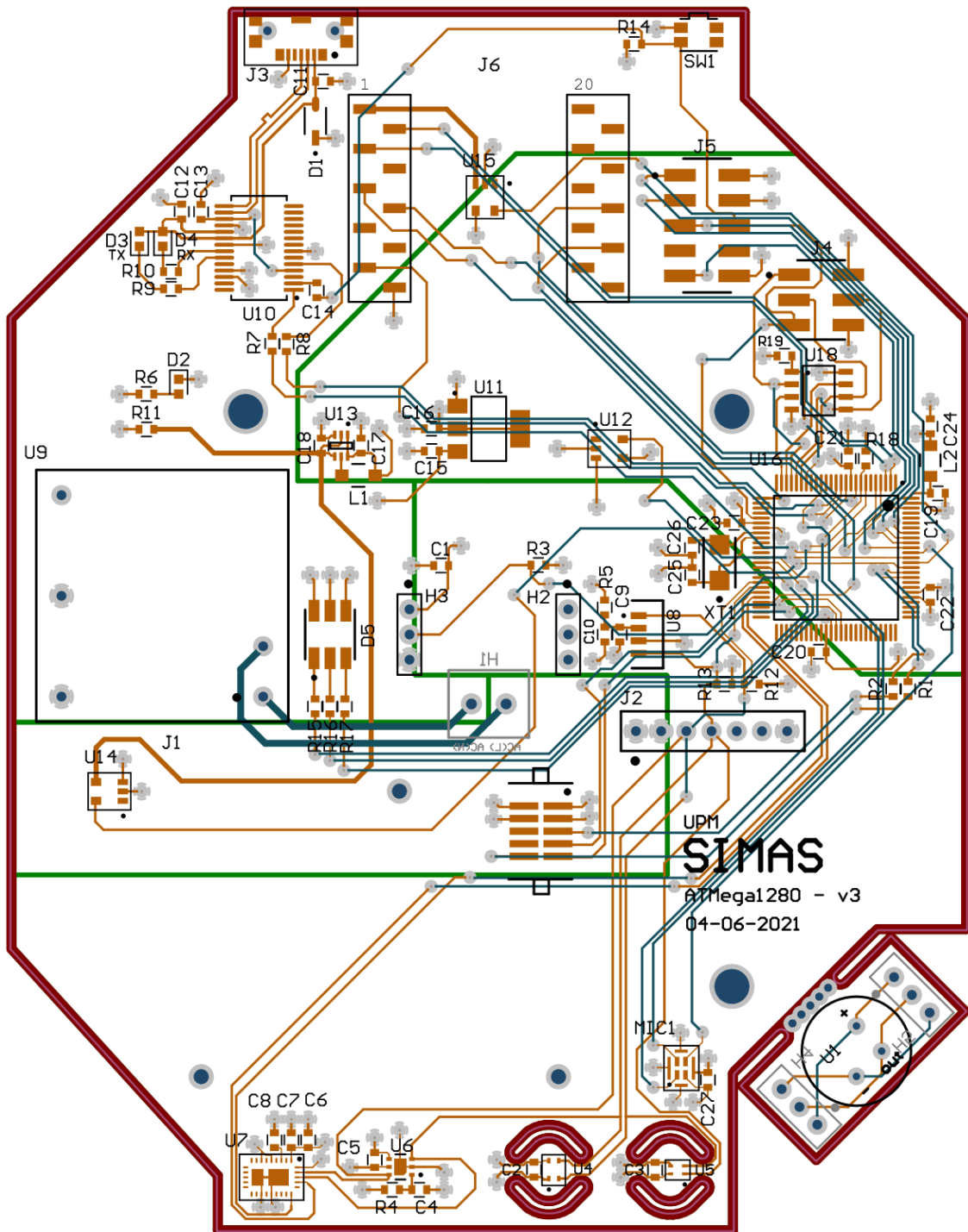


Figura 61. Capas conjuntas

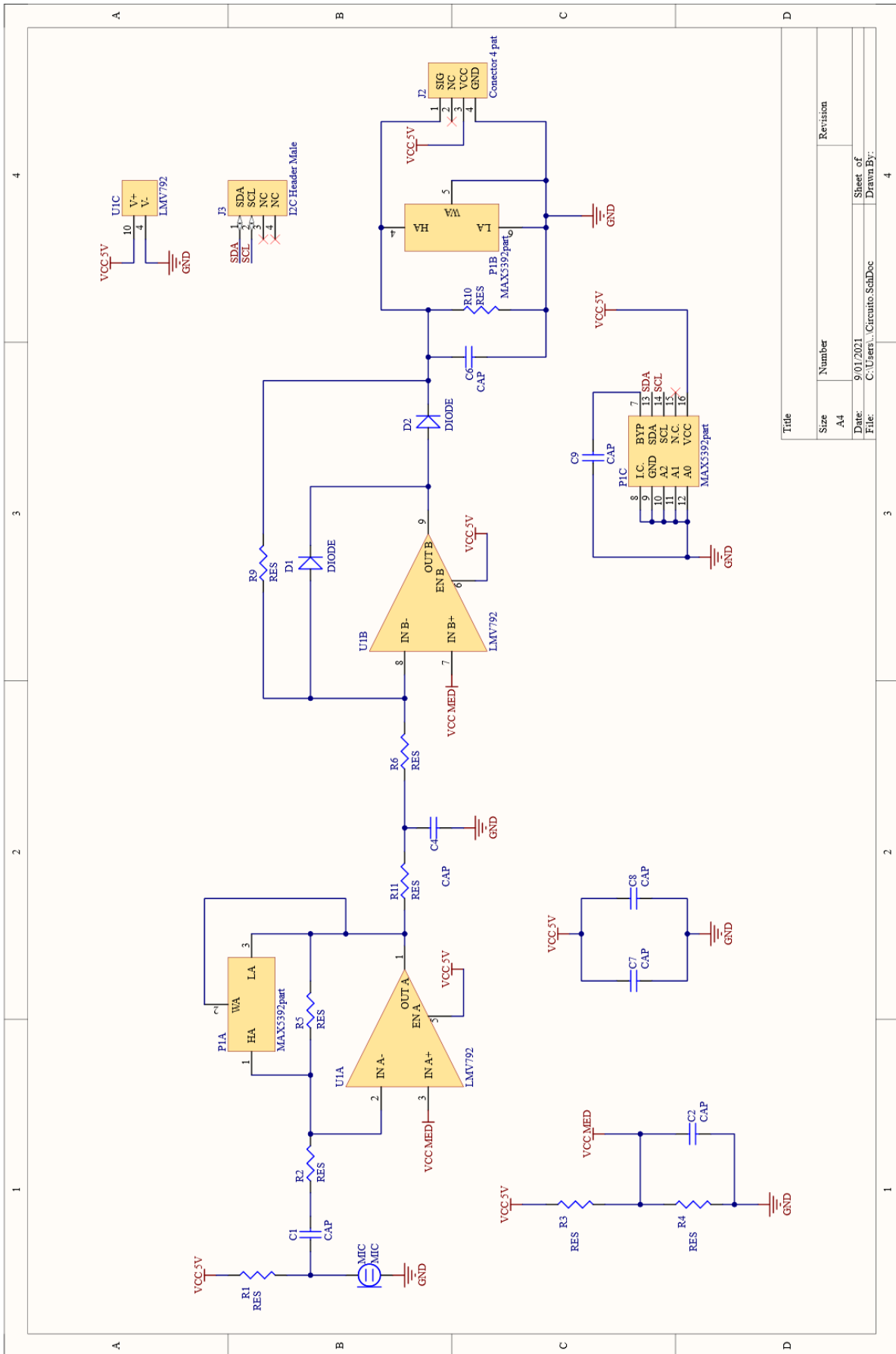


Figura 62. Schematic circuito SPL

COMPONENTES	REFERENCIAS FABRICANTE	POWER	COMUNICACIÓN	RS COMPONENTE	DIGI KEY	TOTAL UDS 20 NODOS	UDS/NODDO	COMENTARIOS
Amphenol	SM-UART-04L	5V	UART		235-1590-ND	-	-	Sensor de Partículas
Antena XBEE	214415-1011				2035119	1	20	
ATmega1280V-8AU	ATmega1280V-8AU	3.3V			1278224	1	20	Microprocesador
AVR128DB48PINS	AVR128DB48-I/PT	3.3V				-	-	Microprocesador
Barrel/Jack	54-00133	5V			839-1516-ND	-	-	Jack de alimentación
BJT Transistor	8C847BW,115				3031596	-	-	
Bobina 0603 4.7uH	MLF1608A4R7KT				7867188	1	20	
Boton de Reset	EVQP7A01P				1789272	1	20	Boton de RESET para el micro
Cap 0603 100mF	C0603C104K4RACTU				2644630	14	300	
Cap 0603 10uF	GRM188R61A106KE9D				8467293	6	120	
Cap 0603 1uF	GCM188R71C105KA64D				7900562	1	25	
Cap 0603 220mF	CO603C224K4RACTU				8015218	1	20	
Cap 0603 4.7uF	CO603C475K8PACTU				6911155	3	50	
Condensador Oscilador 18pF	VI0603A180JXBAC				6520263	2	40	
Conector Honeywell	SFM-105-02-L-D				7679066	1	20	
Conector PIR Hembra	ESQ-103-23-L-S				2081141	2	40	
Conector PIR macho	TSW-103-07-G-S				1612521	2	40	
Conector SCD30	901471107				2134866	1	20	
DC/DC 3.3-5 200mA	TPS61222DCKT	3.3V			8123647	1	20	Convertidor elevador DC/DC de 3.3V a 5V
Diodo Schottky	1N5819HW-7-F				7082197	2	50	
Ferrita Micro	MH3261-601Y				MH3261-601YCT-ND	1	20	Ferrita para el micro Atmega
FlashMemory	SST25VF040B-50-4C-SAF-T	3.3V	SPI		SST25VF040B-50-4C-SAF-TCT-ND	1	20	Memoria Flash
FTDI USB_FT232R	FT232RL-REEL	5V	UART		4065580	1	20	Módulo de conexión USB al micro
Honeywell	HPMA115CO-004		UART		480-HPMA115CO-004-ND	1	15	Sensor de partículas
ISP programmer 1 Hias	10129380-906001ALF				2056312	-	-	
ISP programmer 2 Hias	10129383-906001ALF				2056371	1	20	
JTAG	10129383-910002ALF				2056379	1	20	
KEMET LGS	USEQSEAC82180	3.3V	I2C		399-USEQSEAC82180CT-ND	1	20	Sensor de CO2
LDD STOCK RS	NCP1117S33T3G				7857207	1	20	
LED RGB	KAAP-5050RGBS-13				8721724	1	20	
LED STOCK BROADCOM	ASMB-TTBO-QA3A2				9120500	1	20	
LED Y460 3.5V	1500606S75000	3.5V			8154209	4	100	
Light Pipe	51513031200F				350-375E-ND	2	40	
Micro USB	UB-MC5BR3-SDWPF604-4S-TF	5V			1385622	1	20	Conector Micro USB
MICROFONO	SPK0838HT4H-1				423-1432-1-ND	1	20	
Oscilador 16 Mhz	QC5CB16-0000F18823R				8136116	-	-	
Panasonic	EKMC1603111	5V	DIGITAL		1357102	1	20	Sensor de presencia
Regulador Alterna	BAC05S05DC				811-BAC05S05DC-ND	1	20	5W - 1 A max
Regulador Alterna 2	IRM-05-5				1358923	1	20	5W - 1 A max
Regulador Alterna 3	IRM-10-5				1358929	1	20	10W - 2A max
Res 0603 0	CRW06030000Z0E4HP				8206736	1	25	
Res 0603 10 R	EUJ03F10R0V				7211782	1	20	
Res 0603 100K	CRW0603100KFKEA				6789673	1	50	
Res 0603 10K	RC0603FR-0710KL				1251173	4	100	
Res 0603 1K	RC0603FR-071KL				1995479	9	200	
Res 0603 270	CRW0603270RKEAHP				8206818	3	60	
Res 0603 4.7 R	EUJ03B47R0V				7221147	1	20	
SGD30	SCD30	3.3V	I2C/UART		1720552	1	15	Sensor de CO2 & T & H
SGP40-D-R4	SGP40-D-R4	3.3V	I2C		2047512	1	20	Sensor TVOC
SHT40	SHT40-AD1B-R2	3.3V	I2C		2074760	1	20	Sensor de T & H
SHTC3	SHTC3	3.3V	I2C		1950670	1	20	Sensor de T & H
Switch Diodos Zetex	AP2280-2WG-7				7512985	3	60	
TCK107AFLEFCT	TCK107AFLEFCT-ND	3.3V - 5V			TCK107AFLEFCT-ND	-	-	Switch para Sensores, Xbee & Sensores de 5V
Terminal Cables Red	CTBP3051_2				1444314	1	20	
TSL2771	TSL27713FN	3.3V	I2C		1024172	1	20	Sensor de luz
VELM17700	VELM17700-TR	3.3V	I2C		1808082	1	20	Sensor de Luz
XBEE	XB24CZ7SIT-004	3.3V	UART		1225776	1	15	Módulo Xbee
Xbee Connector	NPPN101BFLD-R				55902-10-ND	-	-	Conector de 10 pines del XBEE de paso 2mm

Figura 63. Hoja de EXCEL con componentes y números de referencia

## 7. ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Niveles de CO2 en aulas de la ETSII .....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2. Concentración de partículas .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3. Detecciones del sensor de presencia .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. Esquema de red tipo Mesh (Lozano-Garzon, 2011).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5. Primer prototipo .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6. Pads y agujeros pasantes .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7. Esquema del sensor de partículas .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8. Esquema del sensor de gases volátiles.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9. Esquema del sensor de CO2, temperatura y humedad .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10. Recortes para el aislamiento térmico del sensor de temperatura.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11. Esquemas de los sensores de temperatura y humedad.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12. Esquema del sensor CO2 de KEMET .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 13. Esquema del sensor de presencia.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14. Circuito de audio prototipo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 15. Esquema del sensor acústico.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 16. Esquema sensor de luz.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 17. Esquema memoria flash.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18. Esquema LED RGB .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19. Esquema conector USB.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 20. Esquema botón RESET.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 21. Esquema circuito de alimentación.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 22. Creación de los símbolos de los componentes.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23. Esquemático SIMAS Sensors.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24. Esquemático SIMAS Power.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 25. Esquemático SIMAS ATmega &amp; Comms .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 26. Esquemático SIMAS RGB &amp; MIC .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 27. Modelo 3D del sensor de presencia.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28. Huella 2D del sensor de presencia.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 29. Vista de planta 3D de los agujeros del sensor de presencia .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 30. Modelo 3D de la carcasa CBHEX1.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 31. Modelo 3D de la carcasa CB1500-10V.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 32. Modelo 3D de la carcasa CBR501VWH.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 33. Placa del sensor de presencia troquelada .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 34. Modelo 3D del módulo Zigbee integrado en la PCB .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 35. Vista de planta en 3D de los conectores del sensor de presencia.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 36. Vista lateral 3D de la PCB integrada en la caja .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 37. Restricciones de espaciado para la situación de componentes.....</i>	<i>51</i>

<i>Figura 38. Opciones del Layer Stack Manager</i> .....	52
<i>Figura 39. Esquema de colores para los diferentes voltajes</i> .....	53
<i>Figura 40. Vista 3D de los planos de cobre para los diferentes voltajes</i> .....	54
<i>Figura 41. Pistas en paralelo en la capa inferior de la PCB</i> .....	55
<i>Figura 42. Pistas y vías entrelazadas</i> .....	55
<i>Figura 43. Diferentes tamaños de pistas y vías en el microprocesador</i> .....	56
<i>Figura 44. Recorte del Design Rule Check</i> .....	57
<i>Figura 45. Vista preliminar de los Gerber Files</i> .....	58
<i>Figura 46. Fichero txt con la secuencia de operaciones para el mecanizado</i> .....	59
<i>Figura 47. Primera versión del segundo prototipo</i> .....	60
<i>Figura 48. Diferencias entre el conector del módulo Zigbee</i> .....	61
<i>Figura 49. Segunda versión del segundo prototipo</i> .....	62
<i>Figura 50. Planificación temporal del proyecto</i> .....	65
<i>Figura 51. Diagrama de Gantt del proyecto</i> .....	66
<i>Figura 52. Schematic SIMAS Sensors ANEXO</i> .....	71
<i>Figura 53. Schematic SIMAS RGB &amp; MIC ANEXO</i> .....	72
<i>Figura 54. Schematic SIMAS Power ANEXO</i> .....	73
<i>Figura 55. Schematic SIMAS ATmega &amp; Comms ANEXO</i> .....	74
<i>Figura 56. Capa Top Layer</i> .....	75
<i>Figura 57. Capa Bottom Layer</i> .....	76
<i>Figura 58. Capa Inner Layer 1 (Planos de alimentación)</i> .....	77
<i>Figura 59. Capa Inner Layer 2 (Plano de masa)</i> .....	78
<i>Figura 60. Capa de Serigrafía (Top/Bottom Overlay)</i> .....	79
<i>Figura 61. Capas conjuntas</i> .....	80
<i>Figura 62. Schematic circuito SPL</i> .....	81
<i>Figura 63. Hoja de EXCEL con componentes y números de referencia</i> .....	82

## 8. ÍNDICE DE TÉRMINOS

**0603:** Huella estándar para componentes pasivos como resistencias condensadores

**Alexa:** Asistente virtual inteligente

**Altium Designer:** Software de diseño profesional de placas de circuito impreso

**AQI:** Air Quality Index o índice de calidad del aire

**Arduino:** Gama de microprocesadores de programación sencilla

**ATmega:** Familia de microprocesadores de la marca Microchip

**Atmel Studio:** Entorno de desarrollo de la marca Microchip

**AVR:** Familia de microprocesadores de la marca Microchip

**Bluetooth:** Protocolo de comunicación inalámbrico

**Board Outline:** Línea que delimita el borde de la placa de circuito impreso

**BOM:** Bill of Materials. Documento que recoge los componentes utilizados en el diseño

**CAD:** Computer-aided design o diseño asistido por ordenador

**Core:** Conjunto de librerías de funciones utilizadas por un microprocesador

**Design Rule Check:** Comprobación de las reglas de diseño en el programa Altium

**Display:** pantalla o medio por el que se muestra información visual

**Electret:** tipo de micrófono con condensador y electrodo

**Ethernet:** Conexión mediante cable de redes LAN y WAN

**ETSII:** Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

**Footprint:** Huella del componente en la placa. Terminaciones del componente

**Gateway:** Punto en común de acceso de los nodos al servidor

**Gerber:** Tipo de archivo necesario para la fabricación de la PCB

**Google Assistant:** Asistente virtual inteligente

**Grafana:** Plataforma de monitorización y análisis de datos

**Grid:** Malla o cuadrícula utilizada en Altium para facilitar la labor del diseñador

**I2C:** Protocolo de comunicación entre dispositivos digitales

**IDE:** Entorno de desarrollo software para la programación de dispositivos

**IFFTTT:** IF This Then That. Protocolo de programación y automatización de tareas

**IoT:** Internet of Things. Internet de las cosas

**ISP:** In-System Programming. Programación de dispositivos una vez instalado o montado

- JTAG:** Joint Test Action Group. Comprobación de PCBs y sus conexiones
- LAN:** Red Local de dispositivos
- Layout:** Disposición de elementos
- LDO:** Low Dropout Regulators. Reguladores de baja caída
- MEMS:** Sistema microelectromecánico que utiliza tecnología microscópica
- Mesh:** Tipo de red inalámbrica
- Microchip:** Marca proveedora de microcontroladores y otros componentes
- MOSFET:** Dispositivo semiconductor
- NC Drill Files:** Archivos de agujeros necesarios para la mecanización de la placa
- NO2:** Dióxido de Nitrógeno
- Off Sheet Connection:** Conexión entre componentes de un documento a otro en Altium
- OTA:** Over the Air. Actualización inalámbrica
- Overlay:** Capa de diseño en Altium que incluye información de los componentes
- Pad:** Huella de pin de un componente. Punto de contacto entre la placa y el pin.
- PC:** Personal Computer. Ordenador
- PCB:** Placa de circuito impreso
- PIR:** Passive Infrared. Detector de sensor infrarrojo pasivo
- PM2.5:** Partículas de diámetro igual o menor a 2.5 micrómetros
- PM10:** Partículas de diámetro igual o menor a 10 micrómetros
- Polygon Pour:** Plano (en Altium) de alimentación o masa que permite incluir pistas en él.
- PPM:** Partes por millón. Unidad de medida
- Pull-Up:** Tipo de conexión en la que se utiliza una resistencia para fijar un valor lógico.
- RESET:** Reinicio de un sistema
- RGB:** Sistema de color basado en la combinación del rojo, azul y/o verde
- Routing:** Establecer las conexiones de los componentes de una PCB
- RPMA:** Random Phase Multiple Access. Tecnología de comunicación para IoT
- RX:** Puerto de recepción de información en la conexión UART
- Schematic:** Documento de Altium que recoge las conexiones de forma esquemática
- SCL:** Puerto de la conexión I2C que utiliza el reloj
- SDA:** Puerto de la conexión I2C que transmite los datos

**Silkscreen:** Capa de la PCB que indica la localización de los componentes

**Smart-Monitor:** Dispositivo de monitorización inteligente con conexión a internet

**SO<sub>2</sub>:** Dióxido de azufre

**Solder Bridge:** Espacio entre componentes que impide una conexión no deseada

**Solder Mask:** Capa de la PCB utilizada para separar las zonas a soldar de las que no

**SPI:** Protocolo de comunicación entre dispositivos

**SPL:** Nivel de intensidad de la presión generada por un sonido

**Standby:** Estado de reposo de un dispositivo

**Supplier Link:** Referencia de un componente con su versión de catálogo del proveedor

**Supply Network:** Red de alimentación de un sistema

**TFG:** Trabajo de fin de grado

**TX:** Puerto de transmisión de información en la conexión UART

**UART:** Protocolo de comunicación entre dispositivos

**UPM:** Universidad Politécnica de Madrid

**USB:** Universal Serial Bus. Conexión y/o alimentación por cable entre dispositivos

**VOC:** Compuestos orgánicos volátiles. Compuestos que contienen carbono

**WiFi:** Tecnología de comunicación inalámbrica

**Xbee:** Módulo de comunicación que utiliza el protocolo Zigbee

**Zigbee:** Conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Airthings. (s.f.). *Airthings.com*. Obtenido de <https://www.airthings.com/resources/airthings-ifttt>

Awair. (s.f.). *getawair*. Obtenido de <https://uk.getawair.com/products/installation-options>

Farah, A. (2018). *medium*. Obtenido de <https://medium.com/density-inc/7-technologies-that-count-people-buildings-offices-742785d2030f>

Lozano-Garzon, C. (2011). *ResearchGate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Diagrama-de-una-red-Mesh-35\\_fig4\\_277857328](https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Diagrama-de-una-red-Mesh-35_fig4_277857328)

Temtop. (s.f.). *Temtopus.com*. Obtenido de <https://temtopus.com/products/temptop-m10-air-quality-detector-professional-formaldehyde-tvoc-pm2-5-monitor-air-quality-meter>

Wilde, L. (2021). *Treehugger*. Obtenido de <https://www.treehugger.com/best-air-quality-monitors-5118199>