

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PATINT
(SISTEMA MEJORADO DE MONITORIZACIÓN EN OBRAS DE ARTE Y
CONSTRUCCIONES DEL PATRIMONIO)**

DIPPATINT

Autor:

AIDIMME

Versión:

1.0

Fecha:

23/12/2019

ÍNDICE

	PÁGINA
1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO DIPPATINT	3
2. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO DIPPATINT	
3. OBJETIVOS CONCRETOS DEL PROYECTO DIPPATINT	6
4. PAQUETE DE TRABAJO 1: DISEÑO ELECTRÓNICO Y COMUNICACIONES DEL SENSOR PATINT	10
5. PAQUETE DE TRABAJO 2: IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBA PRELIMINAR DEL SENSOR PATINT	20
6. CONCLUSIONES	29

1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO DIPPATINT

En el anterior proyecto PATINT, financiado por el IVACE y la Generalitat Valenciana, se concluyó, después de una exhaustiva investigación bibliográfica y de patentes, que el sistema **CADIX** resulta el más adecuado para detectar y monitorizar la biodegradación de la madera. AIDIMA (actualmente AIDIMME) desarrolló entre 2006 y 2008 ese sistema en el marco de proyecto "INVESTIGACIÓN SOBRE MODELOS BIOFÍSICOS PARA LA DETECCIÓN DE LA BIODEGRADACIÓN DE LA MADERA", financiado por el IMPIVA (actualmente IVACE) y por fondos FEDER.

Se consideró que el sistema CADIX es el más adecuado para el propósito anterior por los siguientes motivos técnicos:

- a) El sistema es completamente automático e inalámbrico y monitoriza constantemente la humedad interna de la madera y la existencia de movimientos en su interior. En consecuencia, puede detectar cualquier insecto xilófago (termitas, cerambícidos, anóbidos, líctidos, etc.).
- b) Puede detectar riesgos para la degradación por hongos porque relaciona las condiciones de pudrición con condiciones propias de la madera (contenido en humedad y temperatura).
- c) A diferencia de otros sistemas, este no centra la detección de insectos xilófagos en el hecho de que los insectos tengan que comer en cebos madera, papel o celulosa.
- d) Su flexibilidad permite la futura integración adicional de otros sensores (por ejemplo fisurómetros, medidores de salinidad o galgas extensiométricas).
- e) La radiación del fotoemisor LED, como se encuentra en parte en la zona del espectro infrarrojo, es considerada por las termitas como una fuente de calor, y por ende como un peligro. Por esta razón, si están presentes en un elemento de madera, tienden a acudir al sensor desde cualquier parte del elemento.
- f) El sensor no tiene partes móviles. Es pequeño y compacto, y resulta sencillo de instalar y mantener.
- g) Ha sido probado durante 7 años con resultados exitosos, tanto en laboratorio como en edificios (el archivo de la catedral de Valencia, por ejemplo).

Sin embargo, el sistema CADIX presenta los siguientes problemas e inconvenientes, la mayoría derivados de la evolución de la tecnología en el tiempo transcurrido desde que se desarrolló:

- a) Los sensores son pequeños, pero pueden reducir la resistencia mecánica de elementos estructurales de pequeña sección, dado que funcionan insertados totalmente en el elemento. Para obras de arte, también sería necesario que fueran bastante más pequeños.
- b) El consumo energético de los componentes electrónicos de los sensores es medio-alto comparado con el consumo de algunos componentes similares actuales. Esto causa que haya que cambiar las pilas con cierta frecuencia (6-8 meses).
- c) El cambio de la pila requiere herramienta (alicates y después soldadura) y obliga a sacar el sensor del elemento de madera donde

está insertado, lo que en ocasiones es difícil y requiere medios de acceso (escaleras, andamios, elevadores).

- d) El sistema se basa en comunicaciones al sumidero/estación base mediante red GSM/2G (que implementa el servicio de mensajes cortos de texto o SMS), y no es compatible con 3G/4G o Wifi, ni con el futuro 5G, ya en pruebas.
Esta limitación reduce la cantidad de información que puede transmitirse al sumidero (la que cabe en un mensaje SMS) e imposibilita el uso o compatibilidad con las redes actuales de comunicaciones. Posiblemente la red GSM desaparecerá en los próximos años, y el sistema actual será inservible.
- e) Como el sistema no utiliza nodos repetidores de las señales, en un edificio grande o con muchas plantas es necesario usar varias redes independientes, cada una con un nodo central o sumidero. Esto complica la gestión de los datos y aumenta el precio de la instalación del sistema (los nodos repetidores son mucho más baratos que un nodo central, ya que no necesitan microcontroladores ni programación de éstos).
- f) El sistema no cuenta con protocolos de comunicaciones adaptados a nodos IoT (Internet of Things).
- g) El sistema no es compatible con las normas y protocolos de Smart Cities, algunos de los cuales estaban en desarrollo o aún no existían cuando se diseñó e implementó el sistema.
- h) Falta de escalabilidad: al aumentar el número de sensores y el número de datos transmitidos, el sistema funciona más lentamente y se pierden algunos datos.
- i) La información (mensajes SMS) no se muestra en un *app*.

En el proyecto DIPPATINT se solventan los problemas anteriores.

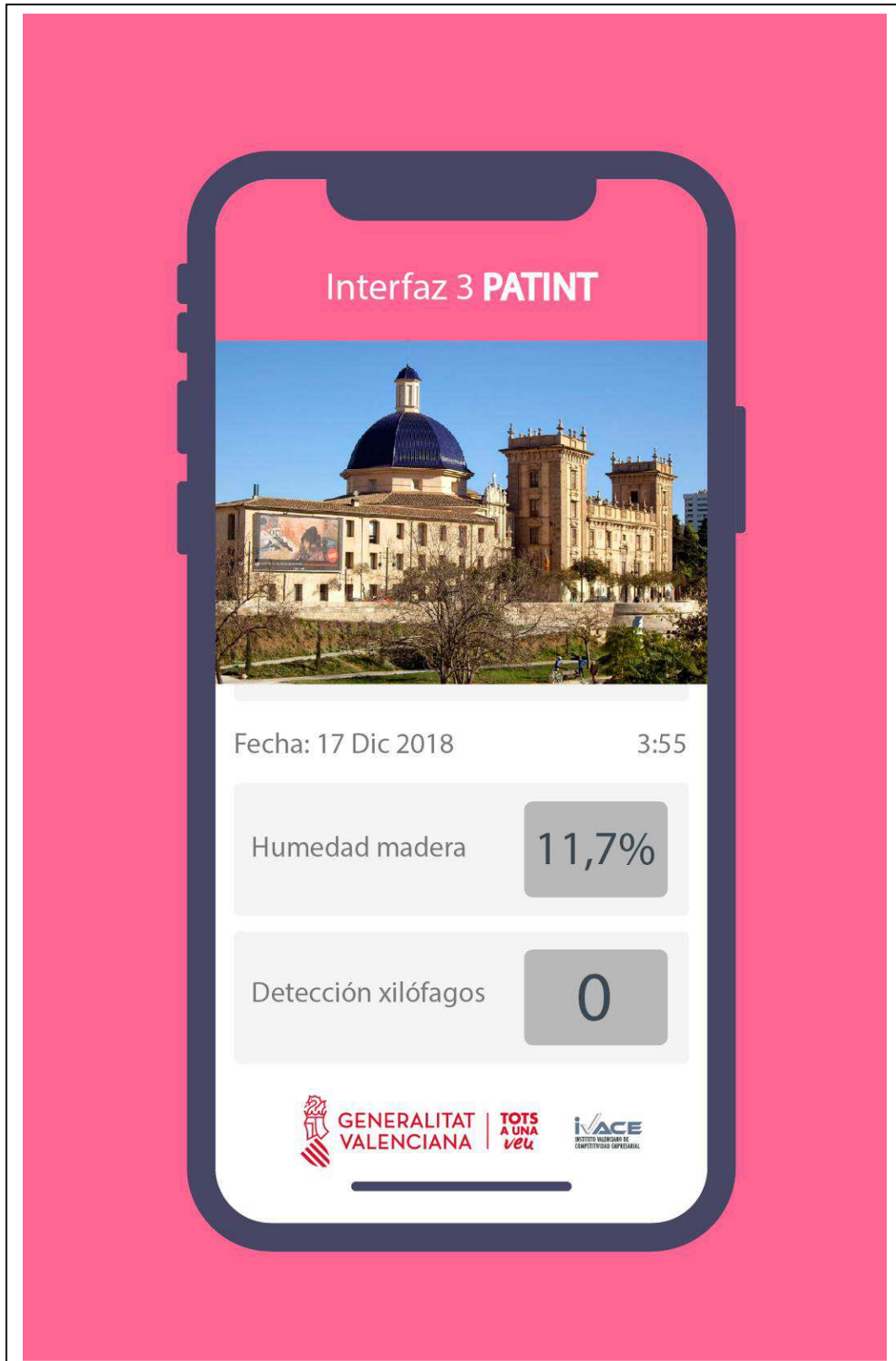


Imagen 1. Ejemplo de la interfaz propuesta en el proyecto PATINT para la visualización de datos de la madera. En este caso no habría alarmas y la humedad de la madera sería correcta.

1. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO DIPPATINT

El presente proyecto incluye diferentes actividades de investigación aplicada para diseñar, desarrollar y probar un sistema (PATINT) con mejoras sustanciales respecto a las herramientas actuales de monitorización preventiva y automatizada de la degradación de materiales, en concreto de la madera y materiales derivados (madera microlaminada, tableros contrachapados, tableros de partículas, tableros de fibras o MDF, madera laminada encolada, etc.).

En la Comunitat Valenciana y en general en el entorno mediterráneo, la madera sufre con frecuencia ataques tanto bióticos (termitas, hongos de pudrición y cromógenos, carcoma fina y gruesa) como abióticos (humedad, salinidad, fuego, radiación solar).

Este material, que forma parte de obras de arte y de estructuras de muchos edificios del patrimonio histórico valenciano, necesita por tanto un sistema de monitorización eficaz y que esté adaptado a las tecnologías TIC más recientes.

La falta de monitorización preventiva de la madera tiene como principales consecuencias:

- a) el deterioro del patrimonio artístico e histórico valenciano, que en algunos casos afecta directamente a la seguridad de los ocupantes y visitantes;
- b) y la necesidad de aplicar tratamientos y rehabilitaciones costosas, a veces con resultados inciertos.



Imagen 2. Degradación de jácenas de madera de un palacio renacentista perteneciente al patrimonio histórico valenciano. Los daños ocasionados por termitas curvaron varios forjados de grandes luces.



Imagen 3. Retablo de Felipe de Vigarny en la parroquia de Cardañuela Riopico (Burgos). Esta obra es una de las producciones singulares del maestro Vigarny, uno de los más importantes escultores del Renacimiento. Por falta de monitorización preventiva, se encuentra muy afectado por carcoma y se necesitan 50.000 € en tratamientos solamente para conservarlo en su estado actual. Fuente: El País (03/12/2018).



Imagen 4. Retablo barroco del siglo XVI-XVII atacado por *Anobium punctatum*. El retablo se encuentra en la iglesia de San Martín (Grajalejo de las Matas, León). Fuente: Diario de León

3. OBJETIVOS CONCRETOS DEL PROYECTO DIPPATINT

Los objetivos concretos del proyecto se exponen a continuación:

- Diseño electrónico de un sensor inalámbrico mejorado para monitorizar la madera en obras de arte y construcciones de patrimonio.
- Implementación y programación del sensor mediante algoritmos propios, e integración de los sensores en una plataforma TIC compatible con Smart Cities o adaptable a ellas.
- Programación de la parte de comunicaciones del sistema de sensores mediante protocolos propios y flexibles, adaptados a las necesidades del patrimonio. Las comunicaciones serán compatible con 3G/4G/WiFi.
- Diseño y programación de interfaz de usuario para visualizar los datos del sistema PATINT.
- Prueba del sistema completo PATINT en condiciones de laboratorio.

Todo lo anterior como propósito que los gestores y rehabilitadores puedan optimizar la prevención de estructuras y obras del patrimonio, salvaguardando así la **riqueza cultural de la Comunitat Valenciana**.

Asimismo, el sistema PATINT puede utilizarse para **monitorizar estructuras nuevas** y vencer la tradicional resistencia en el entorno mediterráneo al uso de madera como material arquitectónico y de ingeniería. El principal factor de esa resistencia es el prejuicio de que la madera se degrada inevitablemente por hongos, humedades e insectos.

4. PAQUETE DE TRABAJO 1: DISEÑO ELECTRÓNICO Y COMUNICACIONES DEL SENSOR PATINT

Tarea 1.1: Diseño electrónico

1.1.1. Introducción

Teniendo en cuenta los requisitos obtenidos en el proyecto PATINT, financiado por el IVACE y la Generalitat Valenciana, se fue diseñando de forma iterativa la parte electrónica del sensor. Tres de esos requisitos fueron los siguientes:

- Tamaño mínimo
- Muy bajo consumo
- Alcance alto

Para el primer requisito se descompuso el sensor en dos módulos separados y conectados por cable. Uno, el de menor tamaño, va insertado en la madera (módulo DIPP_SENS). El segundo, donde está la alimentación eléctrica de la primera parte, se encarga también de la transmisión de los datos por radiofrecuencia (módulo DIPP_RF).

1.1.2. Nodo sensor: módulo sensor insertado en madera DIPP_SENS

La siguiente figura muestra el diagrama inicial de bloques del módulo DIPP_SENS; es decir, del nodo sensor.

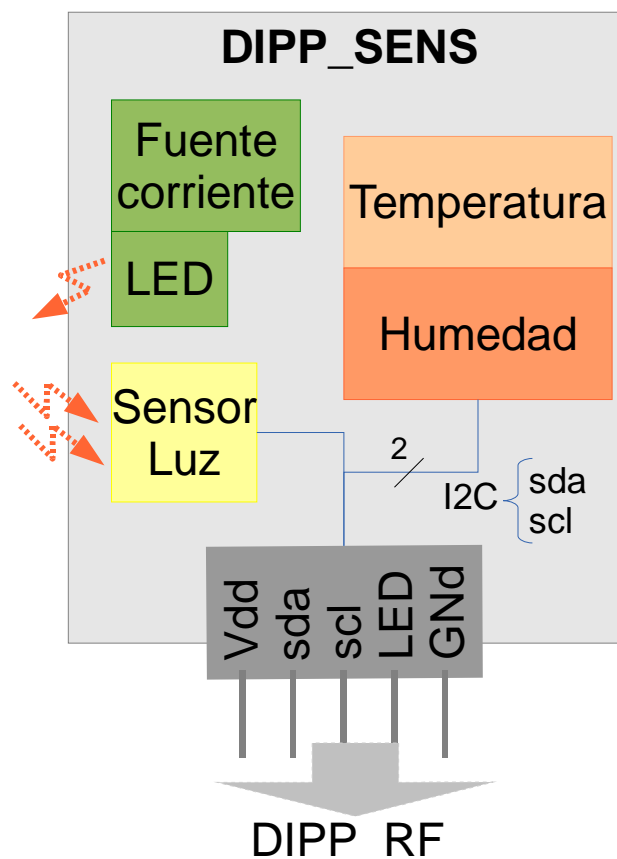
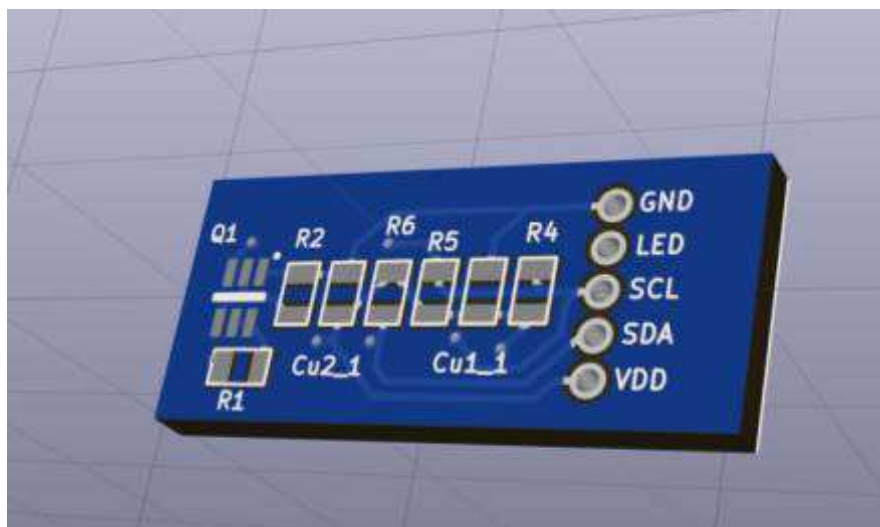
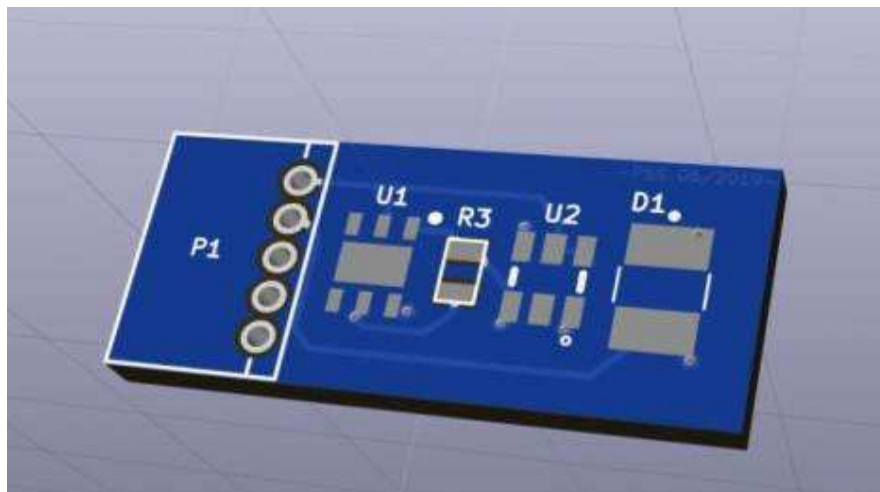


Imagen 5. Diagrama inicial de bloques del módulo DIPP_SENS.

Pin	Nombre	Descripción
1	Vdd	Alimentación: entre 2,5 y 3,6V respecto a masa (pin 5)
2	sda	I2C serial data
3	scl	I2C serial clock
4	LED	Encendido de LED. 0V=LED APAGADO, Vdd=LED ENCENDIDO.
5	GND	Masa o referencia de tensión del circuito, tanto para alimentación como comunicaciones.

A continuación se incluyen algunos esquemas y fotografías de la versión final del módulo DIPP_SENS.



Imágenes 6 y 7. Vistas 3D del PCB del módulo DIPP_SENS

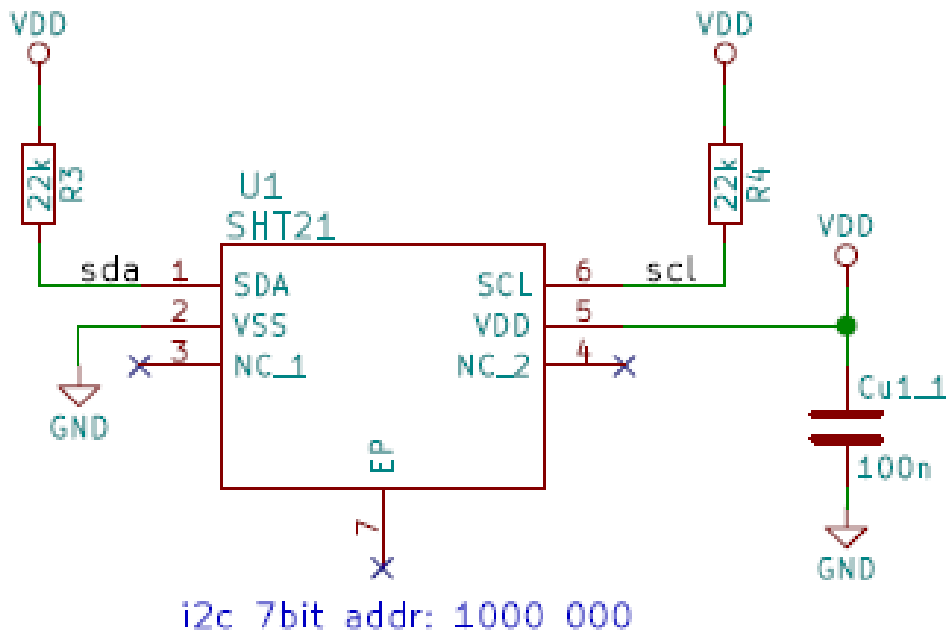


Imagen 8. Esquema eléctrico de parte del módulo DIPP_SENS

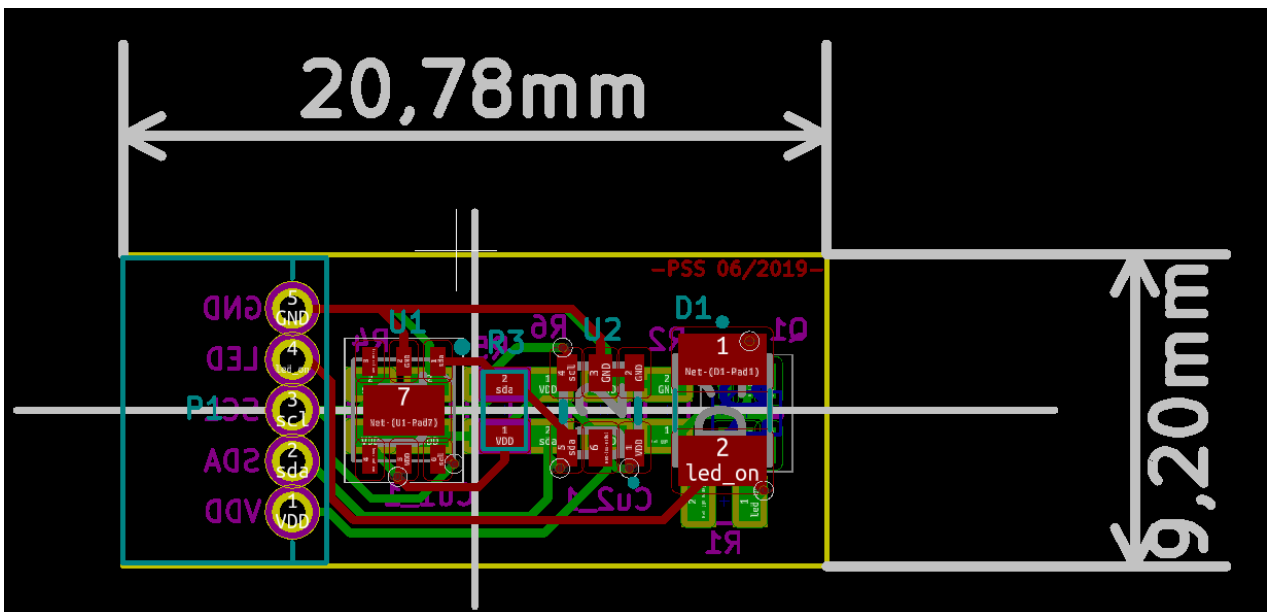


Imagen 9. Dimensiones propuestas para la PCB del módulo DIPP_SENS

1.1.3. Nodo sensor: módulo de control y comunicaciones DIPP_RF

La siguiente figura muestra el diagrama de bloques del módulo DIPP_RF. Este módulo toma las medidas del módulo DIPP_SENS y las transmite por radiofrecuencia al nodo receptor (DIPP_ETH).

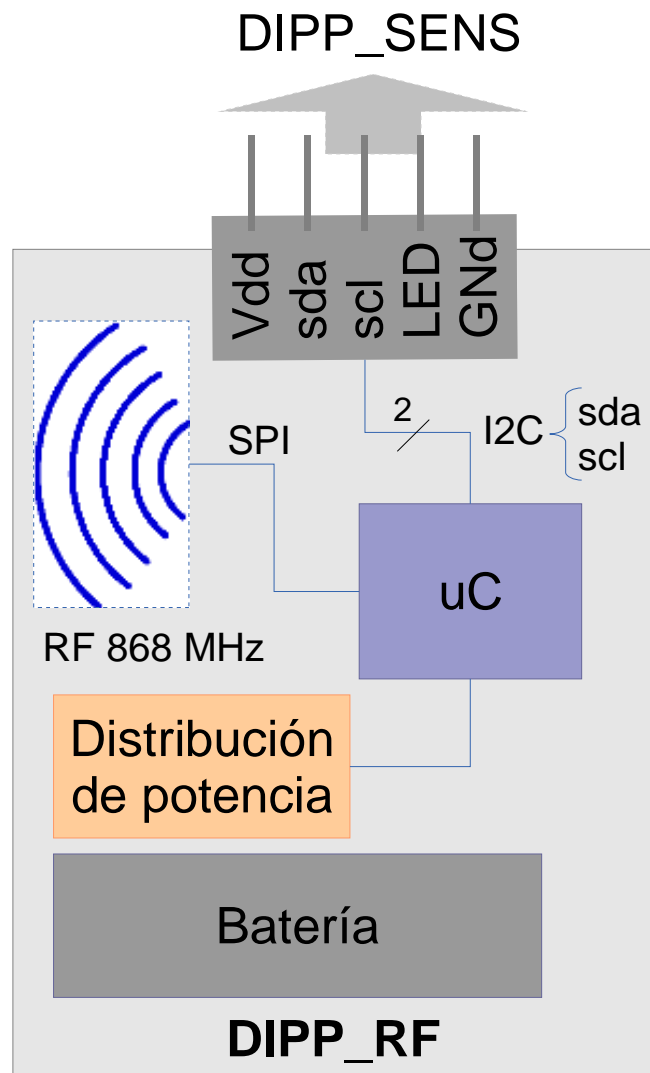


Imagen 10. Diagrama inicial de bloques del módulo DIPP_RF

Cada sensor tiene un identificador (dirección única) que no es modificable por el usuario y que se envía en la cabecera de las tramas de radiofrecuencia.

El microcontrolador (uC) que gestiona este módulo es de consumo muy bajo y permanece la mayor parte del tiempo en modo de hibernación, y cada cierto tiempo se despierta para tomar medidas y transmitir las por radiofrecuencia al nodo receptor.

Asimismo, incorpora un pulsador que permite tomar y transmitir medidas en cualquier momento. La batería puede ser una pila o dos.

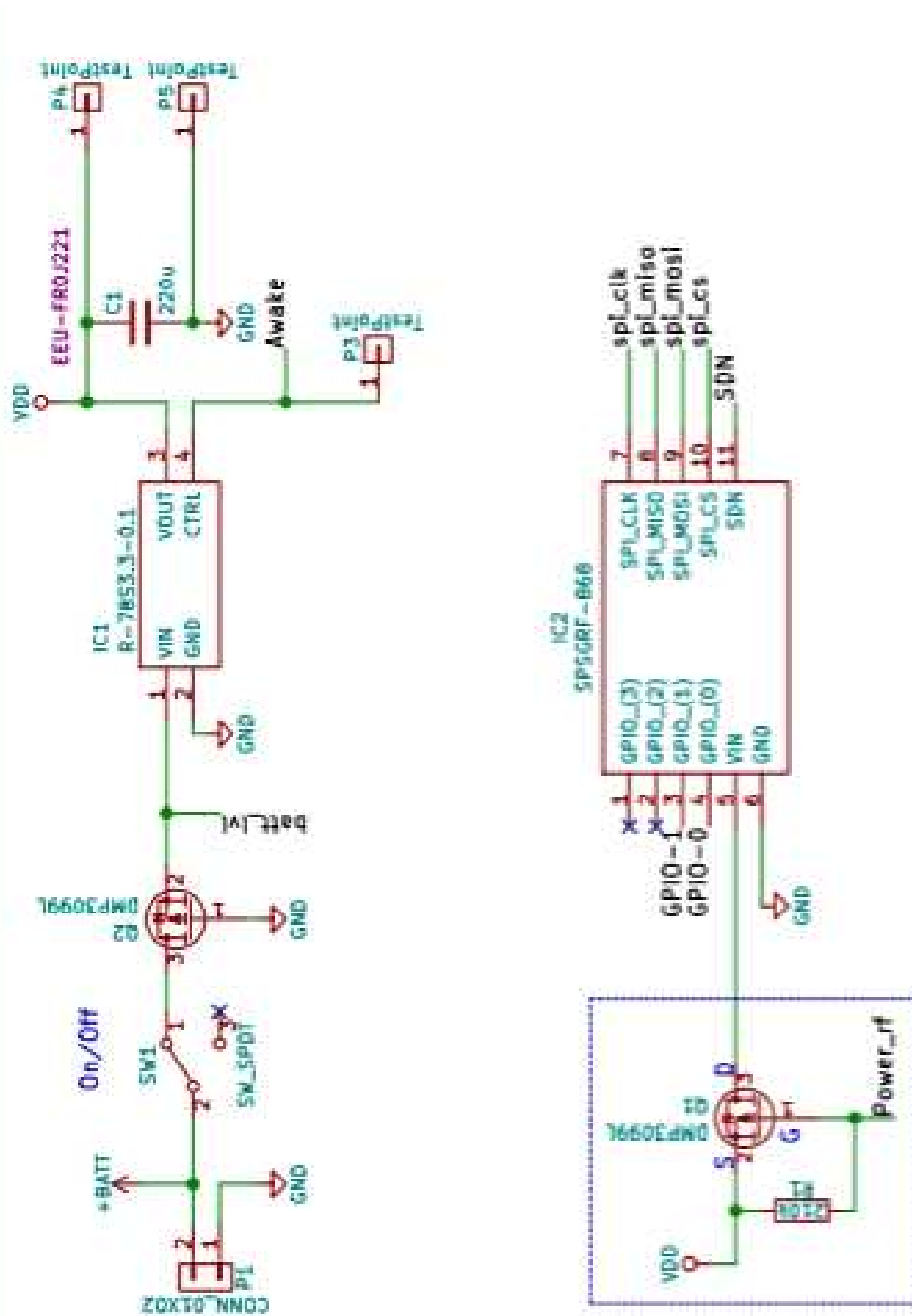


Imagen 11. Esquema eléctrico de parte del módulo DIPP_RF

1.1.4. Nodo receptor DIPP_ETH

El nodo receptor, cuyo diagrama de bloques se muestra a continuación, es el encargado de recoger la información emitida por los sensores y volcarla en la red local para que el software de gestión la almacene en su base de datos.

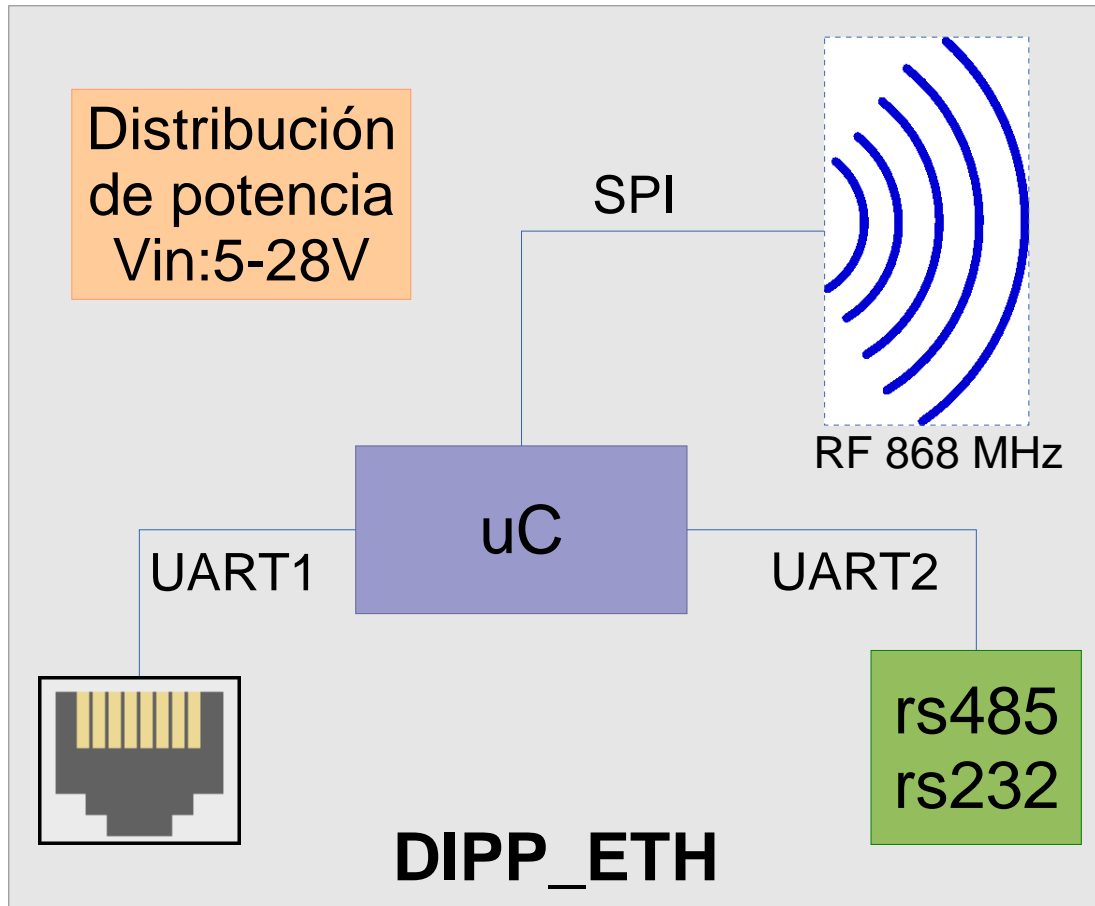


Imagen 12. Diagrama inicial de bloques del módulo DIPP_ETH

Por cada DIPP_ETH, puede haber hasta 32 nodos sensores. Mediante el software de usuario es posible indicar al DIPP_ETH la lista de sensores a registrar.

Esto puede ser útil en una instalación grande, con varios DIPP_ETH, de forma que si un sensor es capaz de comunicarse con más de un DIPP_ETH, solamente uno registre la información y devuelva la cadena de “acknowledge”, evitando colisiones e información redundante.

Este módulo también incorpora un pulsador que permite forzar el envío de la lista de sensores habilitados a la aplicación de usuario.

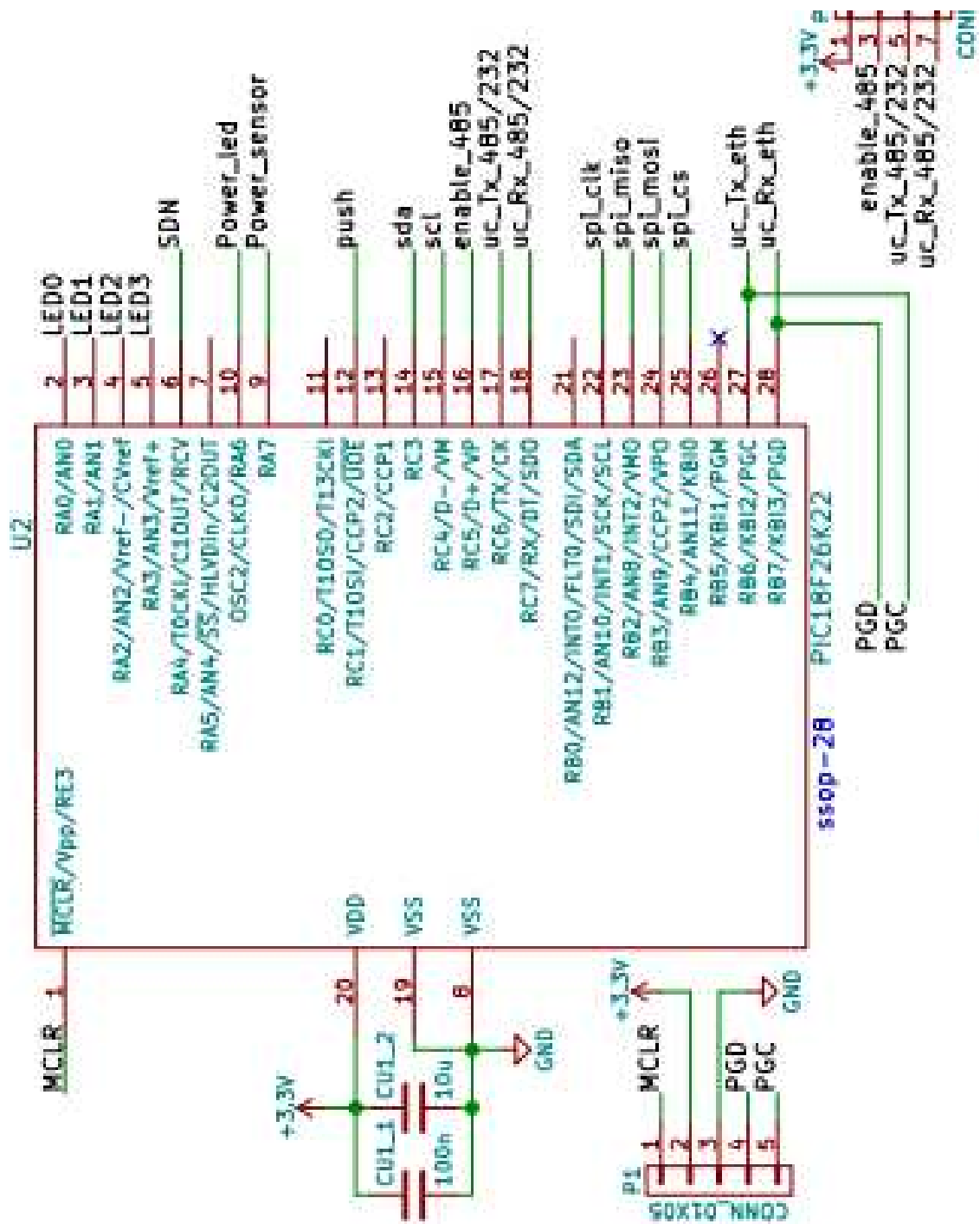


Imagen 13. Esquema eléctrico de parte del módulo DIPP_ETH

Tarea 1.2: Comunicaciones

1.2.1. Comunicación entre DIPP SENS y DIPP RF

Los sensores del módulo DIPP_SENS se comunican con el microcontrolador del módulo DIPP_RF mediante un bus I2C.

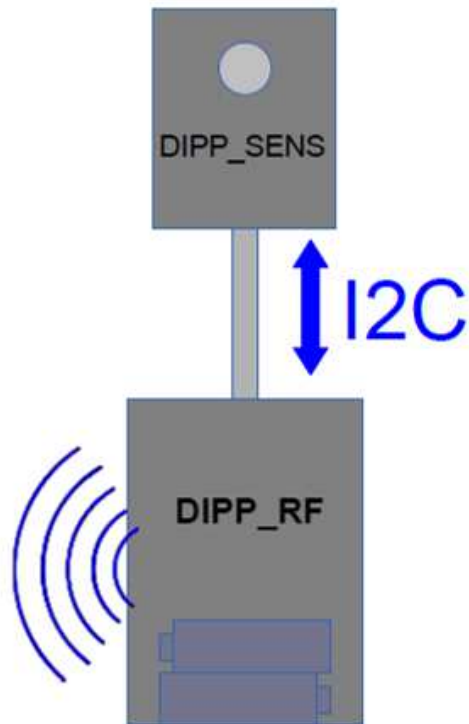


Imagen 14. Esquema de la comunicación entre DIPP_SENS y DIPP_RF.

1.2.2. Comunicación entre DIPP RF y DIPP ETH

La comunicación entre los nodos sensores (DIPP_SENS + DIPP_RF) y el nodo receptor es inalámbrica. Se trabaja en la banda de frecuencia libre en Europa de 868 MHz, que comprende un rango entre 863,15 MHz y 869,95MHz.

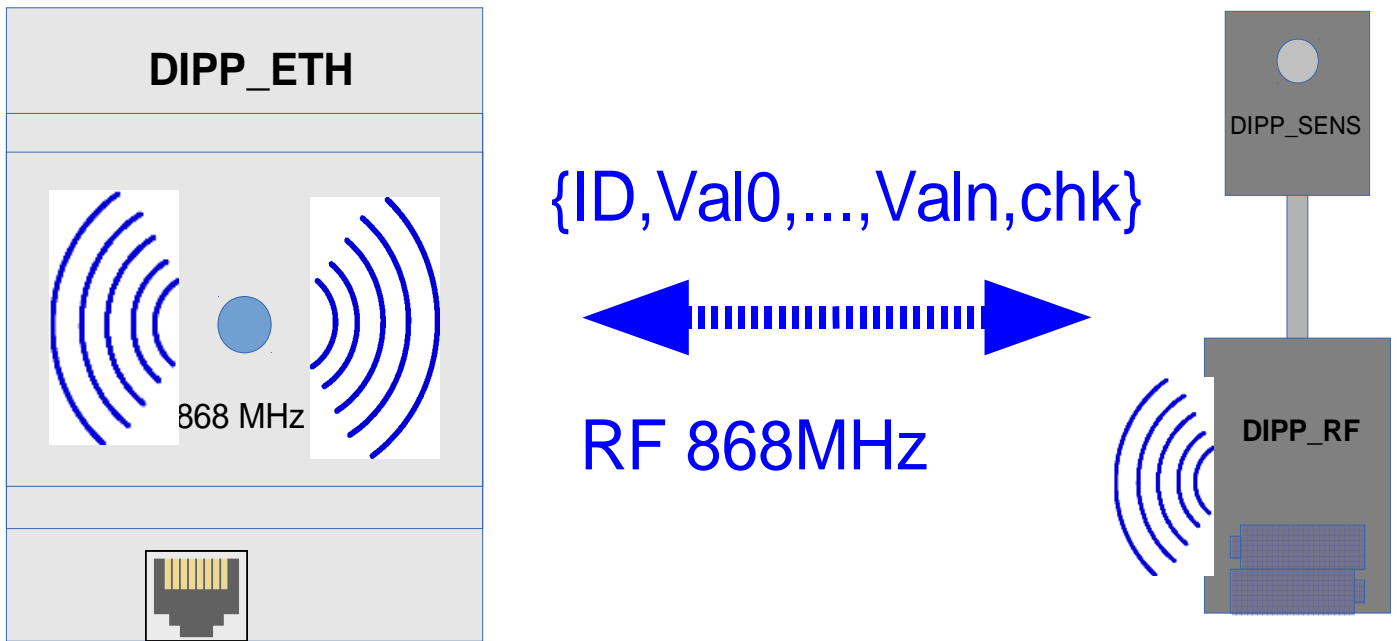


Imagen 15. Esquema de la comunicación entre DIPP_RF y DIPP_ETH. Los datagramas se representan dentro de '{' y '}'.

1.2.3. Formato de las tramas de radiofrecuencia (datagramas)

Todos los comandos o cadenas que se transmitan irán entre los caracteres de inicio y fin, '{' y '}' respectivamente, que serán únicos y no podrán repetirse dentro de la cadena. Además, entre ambos solamente se admitirán caracteres ASCII. Los valores numéricos se convertirán a ASCII en decimal para su transmisión.

Los campos de la cadena a transmitir van separados por comas y el carácter de inicio va seguido del identificador del módulo que transmite.

Al final de la cadena, justo antes del carácter de fin, se incluye un *checksum* para garantizar la integridad de los datos. La siguiente imagen ilustra un ejemplo.

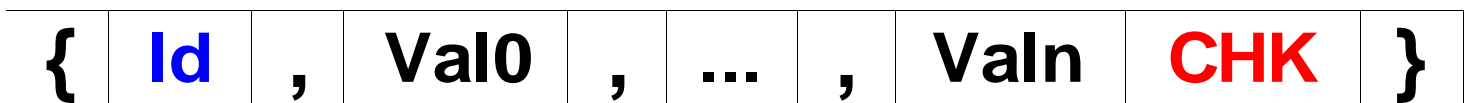


Imagen 16. Ejemplo de una trama del sistema PATINT, que incluye al final el checksum.

El checksum se calcula como la suma de todos los valores ASCII previos al mismo. Es decir, cada carácter ASCII se toma como un valor y se suma para obtener el checksum, cuyo valor se convierte a ASCII en decimal y se incorpora en la cadena a transmitir.

Por ejemplo, si un dispositivo tiene que enviar la cadena "27,-322,5320,1" tiene que añadir una coma, calcular el checksum y añadirlo a la cadena junto los caracteres de inicio y fin:

{27,-322,5320,1,**728**}

Donde el checksum se calcula como la suma de los valores ASCII: 50+55+...+44

caracter	2	7	,	-	3	2	2	,	5	3	2	0	,	1	,
valor	50	55	44	45	51	50	50	44	53	51	50	48	44	49	44

Imagen 17. Valor ASCII de los caracteres de la cadena de ejemplo.

Cada módulo sensor tendrá una dirección única consistente en un número de 32 bits.

Este identificador se pone al inicio de la cadena de datos, tras el carácter de inicio.

5. PAQUETE DE TRABAJO 2: IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBA PRELIMINAR DEL SENSOR PATINT

Tarea 2.1: Implementación del sensor

2.1.1. Implementación del módulo DIPP_SENS

Este módulo no está encapsulado, pues irá insertado dentro de la madera. Por lo tanto, consta de una PCB y de un conector para cable plano de 5 polos, como muestra la siguiente imagen.



Imagen 18. Vista delantera, trasera y lateral del módulo DIPP_SENS.



Imagen 19. Vista delantera del módulo DIPP_SENS en funcionamiento y conectado a su cable de comunicaciones.

2.1.2. Implementación del módulo DIPP_REF

Para el módulo DIPP_REF se ha modificado la PCB superior de un módulo DIP_ETH para montar un prototipo de pruebas con los mismos componentes que llevará el modelo final.

La siguiente figura muestra el prototipo que se ha usado para comprobar y revisar el diseño propuesto (tarea 1.1.3), así como las pruebas de funcionamiento.

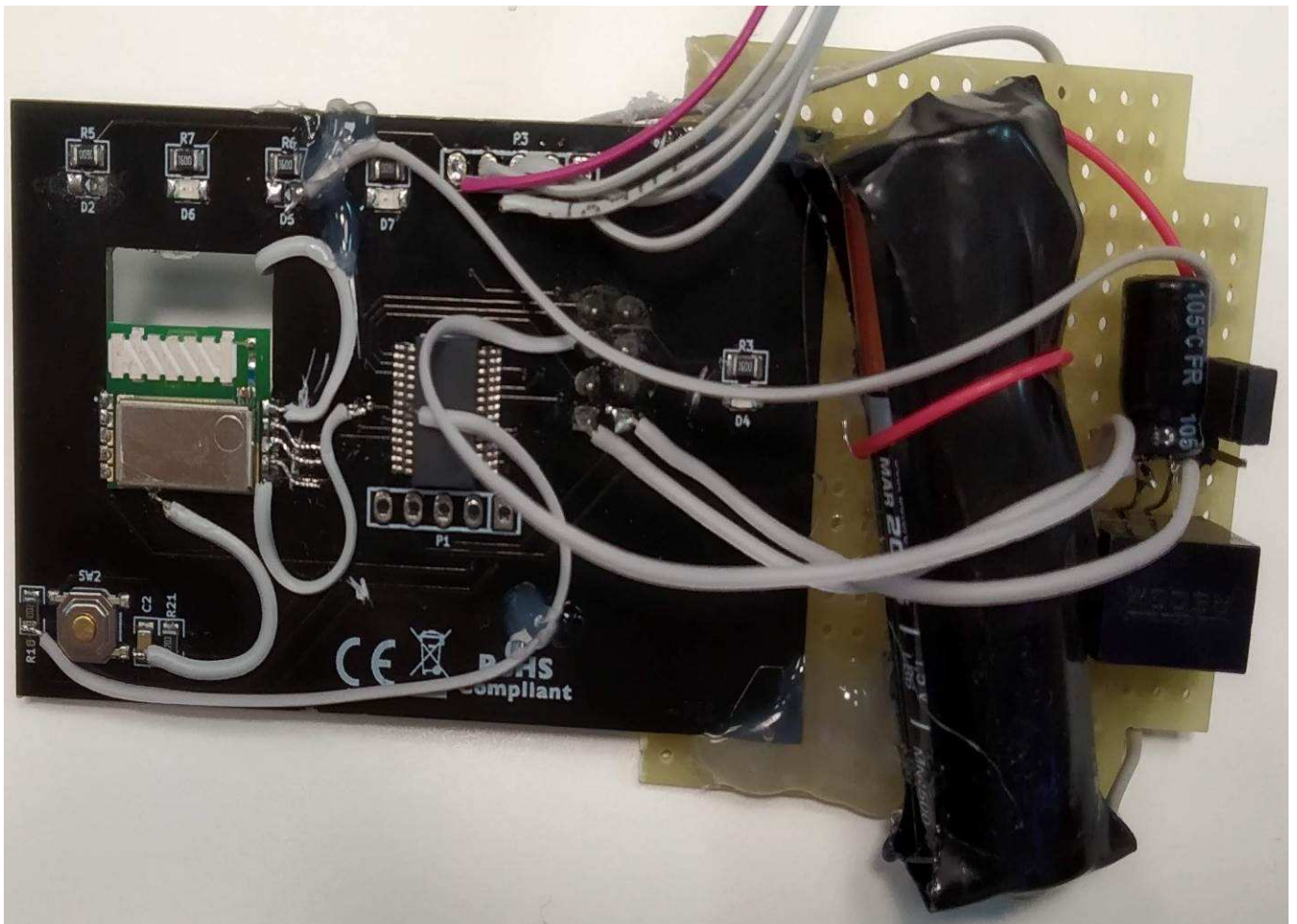


Imagen 20. Prototipo del módulo DIPP_REF.

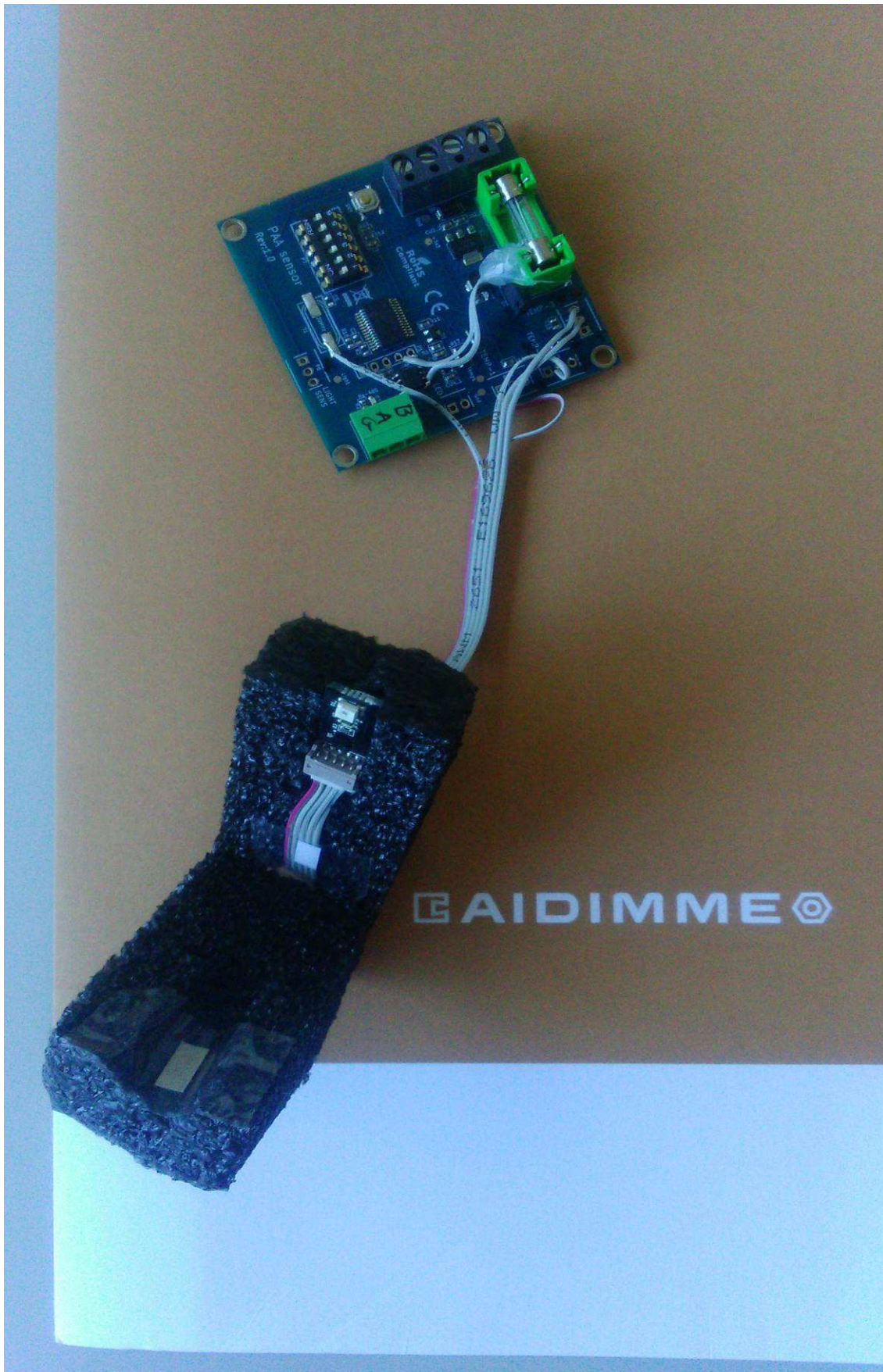


Imagen 21. Vista delantera del módulo DIPP_REF en funcionamiento y conectado mediante cable de comunicaciones al módulo DIPP_SENS.

2.1.3. Implementación del módulo DIPP_ETH

Este módulo se ha implementado como dos PCBs ubicadas en una caja de carril DIN de 4 elementos, como se aprecia en las siguientes figuras.



Imagen 22. Vista completa del módulo DIPP_ETH.



Imagen 23. Vista superior de una PCB del módulo DIPP_ETH.



Imagen 24. Vista delantera de un PCB del módulo DIPP_ETH.

Tarea 2.2: Prueba preliminar del sensor

Todos los componentes del sensor se probaron individualmente y después del montaje se probó cada módulo por separado y en conjunto.

Para ajustar los diferentes parámetros de detección se simuló en laboratorio la presencia de insectos xilófagos mediante un pequeño trozo de papel blanco y se insertó el sensor en espuma de polietileno expandido negro, como muestra la siguiente figura. La simulación se repitió unas 600 veces en distintas condiciones ambientales, variando la luz ambiental, la temperatura y humedad, el ruido ambiental y el ruido electrónico.



Imagen 25. Espuma de polietileno expandido usada para pruebas preliminares del sensor.



Imagen 26. Prueba del sensor simulando la madera con plástico negro y las termitas con papelitos blancos (sensor en modo de hibernación).



Imagen 27. Prueba del sensor simulando la madera con plástico negro y las termitas con papelitos blancos (sensor encendido y en funcionamiento).

Los parámetros que fueron variándose en cada una de las simulaciones fueron los siguientes:

- Ganancia del sensor
- Tiempo de integración (T_int)
- Tiempo de encendido del LED (T_on)

Algunos de los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Ganancia	T_int	T_on	SIN PAPEL		CON PAPEL	
			Visible ON	IR ON	Visible ON	IR ON
1	13	30	5	1	136	28
1	100	200	40	9	1000	210
1	400	800	159	35	3966	834
16	13	30	87	19	2171	456
16	100	200	644	142	15969	3359
16	400	800	2543	561	63312	13323

Puede observarse que la señal obtenida es unas 25 veces superior cuando hay papel que cuando no lo hay, para todos los tiempos de integración y para las 2 opciones de ganancia (1 y 16). Por tanto, el sensor puede detectar, sin errores debidos a interferencias, ruido térmico o electrónico, la presencia de insectos xilófagos.

6. CONCLUSIONES

Se han diseñado, implementado y probado preliminarmente en laboratorio prototipos de los tres módulos del sistema PATINT: módulo sensor insertado en la madera (DIPP_SENS), módulo de control y comunicaciones (DIPP_REF) y nodo receptor (DIPP_ETH).

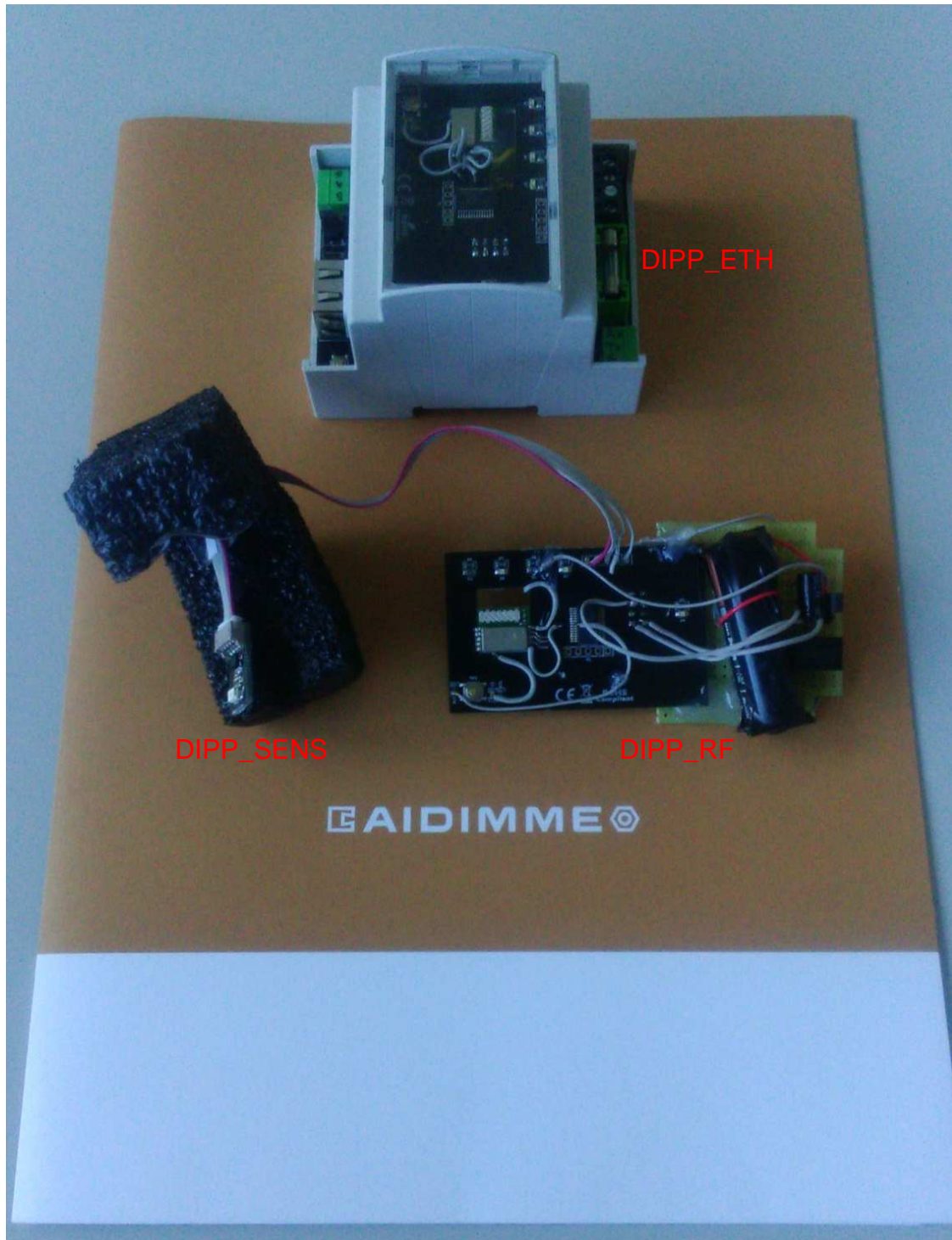


Imagen 28. Módulos del sistema PATINT.