

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Implementación de un sistema de monitorización para raíles ferroviarios

Autor: Antonio David Villegas Muñoz de León

Tutores: Fernando Muñoz Chavero

José María Hinojo Montero

Dpto. de ingeniería electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Implementación de un sistema de monitorización para raíles ferroviarios

Autor:

Antonio David Villegas Muñoz de León

Tutores:

Fernando Muñoz Chavero
Catedrático de universidad

José María Hinojo Montero
Investigador Postdoctorado

Dpto. de ingeniería electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Carrera: Implementación de un sistema de monitorización para raíles ferroviarios

Autor: Antonio David Villegas Muñoz de
León

Tutores: Fernando Muñoz Chavero
José María Hinojo Montero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Gracias a mi familia y amigos por su apoyo incondicional y mi más sincero agradecimiento a José María Hinojo, mi tutor del TFG, por todo su apoyo en este proyecto.

*Antonio David Villegas Muñoz de León
Departamento de ingeniería electrónica
Sevilla, 2024*

Resumen

A día de hoy, la monitorización de infraestructuras críticas en tiempo real es vital para determinar tanto su estado de conservación como su correcto funcionamiento. Para ello, es necesario disponer de elementos de medida que puedan adquirir los parámetros más relevantes de estas infraestructuras para su posterior procesamiento. Una de las infraestructuras que requiere de este tipo de sistemas es la ferroviaria debido a su extensión y sometimiento a las inclemencias del tiempo.

Por tanto, el presente Trabajo Fin de Grado busca diseñar e implementar una tarjeta impresa que monitorice la inclinación de una superficie, así como las vibraciones que se producen en los raíles de las vías ferroviarias. Con ello, se pretende evaluar su estado. Como consecuencia de la falta de energía en este entorno, el diseño propuesto tendrá un claro enfoque hacia el bajo consumo. Además, será compatible con las dimensiones de los raíles para minimizar su impacto al ubicarlo en estos.

Abstract

Nowadays the constant surveillance of critical infrastructure in real time is vital in determine its maintenance and its operation. In doing so it's needed to have a measure element that can acquire the most relevant data of this infrastructure for its later processing. One of such infrastructure is the railroad system due to its size and the fact that is expose to the weather.

Due to the already mention, this Final Degree Project aims to design and implement an acquisition system that monitors the surface inclination, as well as the vibrations that are produced in the railroad tracks. Consequently, it is intended to assess the state of the railroad. As consequence of the lack of energy in this environment, the proposed design is focused on low power consumption. Furthermore, its size and form will be compatible with the railroad track to reduce the impact when it is placed on them.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	1
Abstract	1
Índice	1
Índice de Tablas	1
Índice de Figuras	1
1 Introducción	1
2 Estado del arte de los sensores	3
2.1.1 Inclinómetro estático	4
2.1.2 Inclinómetro dinámico	4
2.1.3 Parámetros relevantes	5
2.2.1 SCA830-D07-1	5
2.2.2 MXD6240AU	5
2.2.3 SCL3300-D01-10	6
2.2.4 ADIS16203CCCZ	7
2.2.5 SCL3400-D01-1	7
3 Procesamiento de la Información Adquirida	11
4 Diseño del dispositivo	13
4.1.1 Etapa de potencia	13
4.1.2 Sensores	14
4.1.3 Microcontrolador	15
4.2.1 Microcontrolador	17
4.2.2 Reguladores lineales	18
4.2.3 Acelerómetro	19
4.2.4 Inclinómetro	19
4.2.5 Cargador de batería	20
5 Test eléctrico del PCB	25
5.1.1 Revisión de los componentes	25
5.1.2 Verificación de la calidad de las soldaduras	25
5.2.1 Prueba de continuidad	26
5.2.2 Prueba de aislamiento	26
5.3.1 Prueba de alimentación	26
5.3.2 Pruebas de señal	27

5.3.3 Pruebas de comunicación	27
6 Conclusiones	28
Anexos A. Creación de componentes o edición de existentes en CircuitMaker	29
Referencias	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del sensor SCA830-D07-1.	5
Tabla 2. Características del sensor MXD6240AU.	6
Tabla 3. Características del sensor SCL3300-D01-10.	7
Tabla 4. Características del sensor ADIS16203CCCZ.	7
Tabla 5. Características principales del sensor SCL3400-D01-1.	8
Tabla 6 Inclínómetros comerciales revisados.	9
Tabla 7. Características principales del sensor BMA400.	10
Tabla 8. Tabla de característica del dispositivo Texas Instruments BQ25629RYKR.	14
Tabla 9. Características del regulador lineal TC1185-3.3VCT713	14
Tabla 10. Especificaciones del dispositivo STM32L432KCU (I).	15
Tabla 11. Especificaciones del dispositivo STM32L432KCU (II).	16
Tabla 12. Asignación de los pines para el sensor BMA400.	16
Tabla 13. Asignación de los pines para el sensor SCL3300.	16
Tabla 14. Asignación de los pines elegidos para el control y supervisión de la etapa de potencia.	16
Tabla 15 Pines restantes usados por el microcontrolador.	16
Tabla 16. Batería de pruebas realizadas para validar la tarjeta.	25
Tabla 17. Tabla conexiones BQ25629RYKR.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica de una estructura tipo MEMS empleada para medir la inclinación de un plano. [1].	3
Figura 2. Representación gráfica de un ejemplo de un inclinómetro dinámico donde se muestra el valor de la aceleración y ángulo devueltos por el acelerómetro y giroscopio.	4
Figura 3. Imagen del sensor SCA830-D07-01.	5
Figura 4 Imagen del MXD6240AU.	6
Figura 5 Imagen del SCL3300-D01-10.	6
Figura 6 Imagen ADIS16203.	7
Figura 7. Imagen de SCL3400-D01-1.	8
Figura 8 Acelerómetro BMA 400.	10
Figura 8. Dependencia con la temperatura del error en la medida del eje X, [3].	11
Figura 8. Dependencia con la temperatura del error en la medida del eje Y, [3].	11
Figura 8. Dependencia con la temperatura del error en la medida del eje Z, [3].	12
Figura 10. Diagrama de bloques del sistema de monitorización implementado.	13
Figura 11. Diagrama de bloques que muestra la implementación de la etapa de potencia.	14
Figura 12. Diagrama de bloques del módulo de sensores integrado en el sistema de monitorización.	15
Figura 13. Sistema completo del esquemático en formato de bloques.	17
Figura 14. Esquemático del microcontrolador.	18
Figura 15. Esquemático de los reguladores lineales empleados.	18
Figura 16. Esquemático del acelerómetro BMA400.	19
Figura 17. Esquemático del inclinómetro SCL3300.	19
Figura 18. Esquemático del cargador de batería BQ25629RYKR.	21
Figura 19. Stack-up seleccionado para implementar la tarjeta impresa.	21
Figura 20. Top de la tarjeta diseñada (capa 1).	22
Figura 21. Plano de tierra de la tarjeta diseñada (capa 2).	22
Figura 22. Planos de alimentación incluidos en la tarjeta diseñada (capa 3).	23
Figura 23. Bottom de la tarjeta diseñada (capa 4).	23
Figura 24. Vista 3D de la tarjeta impresa diseñada.	24
Figura 24. Imagen de la tarjeta fabricada y ensamblada.	24
Figura 25. Barra de herramientas para la edición de componentes.	29
Figura 26. Menú para la edición de un componente.	29

Figura 27. Crear una parte desde cero	30
Figura 28 Descripción de un componente	30
Figura 29. Botones de creación de símbolos y huellas.	30
Figura 30. Creación de un símbolo.	31
Figura. 31 Creación de una huella.	31
Figura 32. Símbolo del componente Murata SCL3300-D01-10.	32
Figura 33 Huella del componente Murata SCL3300-D01-10	32
Figura 34. Símbolo del componente Texas Instruments BQ25629RYKR.	33
Figura 35 Footprint Texas Instruments BQ25629RYKR	33
Figura 36. Símbolo del componente Vishay NTCS0603E3103JHT.	34
Figura 37. Huella del componente Vishay NTCS0603E3103JHT.	34

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la electrónica está avanzando a pasos agigantados permitiendo cada vez obtener más funcionalidades mediante el desarrollo de nuevos dispositivos con mayor eficiencia energética y mejores prestaciones. Este hecho se debe a una disminución de los costes de producción, una mayor precisión en la medición, una reducción del consumo y un incremento de la complejidad de los sistemas que contribuye a simplificar la programación de los dispositivos al poder hacer la mayor parte del cálculo en *hardware*. Todos estos cambios posibilitan nuevas aplicaciones que se benefician de estas mejoras como es monitorizar la salud estructural de infraestructuras críticas.

La monitorización de infraestructuras críticas en tiempo real es una tarea crucial debido a que permite tomar decisiones para realizar acciones de mantenimiento preventivo y, con esto, garantizar su continuo funcionamiento. Esto es importante para evitar posibles fallos catastróficos que se produzcan de forma inesperada, evitar la necesidad de mantenimientos innecesarios y/o paradas innecesarias debido a la ejecución de estas acciones. Además, permite ahorrar costes debido a que no se necesita que no es necesario desplazar equipos de trabajo hasta la localización. Para ello sólo es necesario disponer de un equipo informático donde una persona o un algoritmo pueda procesar los datos obtenidos y generar las alertas necesarias. No obstante, seguirá siendo necesaria una cierta inspección periódica de la infraestructura para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. No obstante, estas revisiones pueden espaciarse en el tiempo, ahorrando gran cantidad de recursos.

Estas mejoras son posibles debido a que el consumo se reduce permitiendo que duren más tiempo y por tanto que no necesite tanta recarga, luego al ser la conexión a través de la red más accesible permite la transmisión de información desde lugares que antes no era posible. De esta forma se pueden reducir los retrasos en las vías ferroviarias volviendo más atractivo el viaje en tren y además permitiendo encontrar fallos en las vías más rápidamente.

Este proceso se centrará en la creación de un dispositivo para monitorizar los raíles lo que permite darles reparación y mantenimiento antes de que el problema ocurra, mediante un sensor colocado en la propia vía. Este dispositivo se basa en recoger los datos de las vibraciones de las vías y posteriormente analizarlas para encontrar fallos en la estructura a tiempo y ahorrar tiempo y dinero a la hora de hacer reparaciones.

Este trabajo tiene como objetivos:

1. Estudio y selección de los sensores más adecuados para estimar la salud estructural de vías ferroviarias analizando las vibraciones de los raíles.
2. Diseño de una tarjeta de adquisición para monitorizar la aceleración e inclinación de raíles de forma autónoma.
3. Validación eléctrica de la tarjeta.

A continuación, se describe la estructura de la presente memoria de Trabajo Fin de Grado:

- **Capítulo 2:** recoge el estado del arte de sensores comerciales discretos de tipo inclinómetros y acelerómetros. Además, se detalla su principio de operación.
- **Capítulo 3:** en este capítulo se detallan los algoritmos empleados para corregir la información devuelta por los sensores analizados en el Capítulo 2, así como la obtención de la información relevante.
- **Capítulo 4:** en él se describe el proceso de diseño e implementación de la tarjeta de adquisición

desarrollada.

- **Capítulo 5:** este capítulo recoge el plan de pruebas y el resultado de cada una de las pruebas realizadas para validar y verificar el correcto funcionamiento de la tarjeta implementada.
- **Capítulo 6:** en este capítulo se presentan las conclusiones del presente trabajo junto con las futuras líneas de investigación que se habilitan tras la realización del presente trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE DE LOS SENSORES

A la hora de monitorizar la salud estructural de una vía ferroviaria es importante poder medir la inclinación que presenta en el rail junto con la vibración que aparece en el mismo. Por este motivo, los principales sensores empleados son acelerómetros e inclinómetros. Esto se debe a que los inclinómetros nos permiten monitorizar la dirección del movimiento y su posición final; y los acelerómetros, al medir la aceleración a la que está sometida, permiten obtener información sobre las vibraciones a las que está sometida. Por tanto, el presente capítulo realizará una revisión de los principios de operación de estos sensores, así como una descripción de las principales magnitudes que caracterizan su operación. Además, se hará una revisión de los dispositivos comerciales comerciales y se seleccionarán aquellos que sean de interés para la aplicación.

Los inclinómetros son sensores cuya función es obtener la variación del ángulo con respecto al vector de la fuerza gravitatoria y se hace midiendo la fuerza que ejerce la gravedad sobre el dispositivo. Esto se hace midiendo la fuerza recibida y comparándola con la gravedad. Un ejemplo de estructura usada en inclinómetros es la representada en la Figura 1. Como se puede observar, está compuesta por una masa anclada por los muelles a las paredes lo que facilita sus movimientos, lo que varía la distancia entre las placas de metal que forman los condensadores y provocando un cambio en la medida

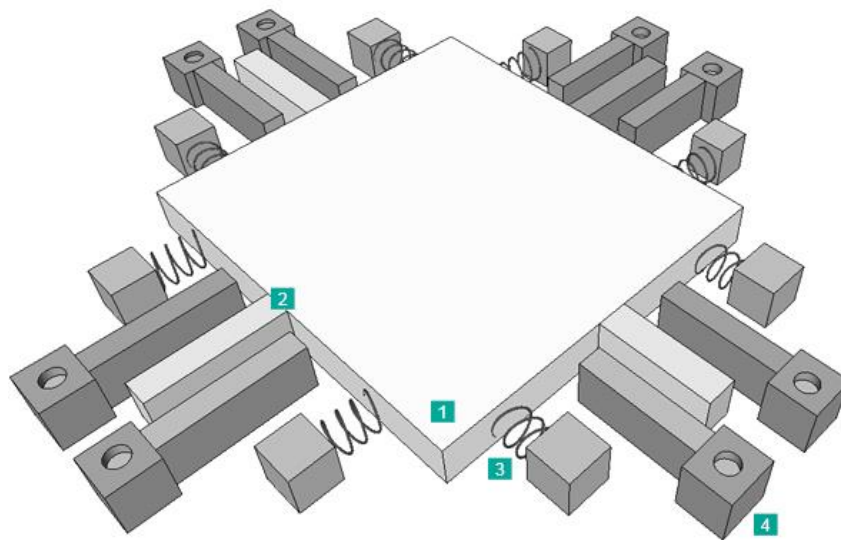


Figura 1. Representación gráfica de una estructura tipo MEMS empleada para medir la inclinación de un plano. [1].

Los números que se muestran en la Figura 1 corresponden a los siguientes elementos:

1. **Masa que da el peso:** Esta es la parte que más es afectada por la fuerza gravitatoria debido a que su masa es relativamente más grande que el resto de las estructuras para poder medir su movimiento más fácilmente.
2. **Electrodos móviles:** son placas de metal que al pasar corriente por ellas funcionan como platos de condensadores que forman una capacidad entre los electrodos fijos y los móviles que se puede medir.

3. **Muelles:** Hilo de metal que almacena energía permitiendo una compresión más lenta y un retorno a su estado original en caso de que la fuerza aplicada se desvanezca.
4. **Electrodos fijos:** Es igual que el electrodo, pero está en la estructura alrededor de la masa.

El funcionamiento puede ser simplificado como un modelo de dos electrodos, uno fijo y uno móvil (el que posee la masa), aguantado por muelles. Cuando está en horizontal, la capacidad de los dos electrodos está medida. Si sacudes el dispositivo, la capacidad varía debido a la variación de la distancia entre los electrodos y esto permite calcular el ángulo mediante una ecuación que veremos en un apartado posterior.

Por último, cabe indicar que existen dos tipos de inclinómetros: estáticos y dinámicos. En las siguientes subsecciones, se describirán sus principales características y principio de operación.

2.1.1 Inclinómetro estático

Los inclinómetros estáticos son aquellos que no cuentan con métodos para poder anular los efectos de la aceleración externa, el ruido y el error inicial del dispositivo por sí mismo. Por tanto, se necesita que estos errores sean despreciables o se anulen con algún sensor externo y un procesamiento posterior de los datos.

En caso de golpes y vibraciones, el inclinómetro no es capaz de filtrar el ruido, siendo imposible dar una medida precisa de la inclinación de la superficie. En algunos inclinómetros se incluyen filtros exponenciales o filtros de media móvil para suavizar y filtrar parte del ruido inherente de la medida. Sin embargo, este tipo de medidas limitan la velocidad de respuesta del sistema, ya que requieren de varias muestras para dar un valor, reduciendo la tasa de muestreo y, por tanto, eliminando información relevante que pueda usarse para llevar a cabo los estudio de salud estructural. Además, en el caso de necesitar medir ángulos en sistemas que estén sometidas a elevadas aceleraciones, esta variante no resultan precisos debido a su reducida tasa de muestreo.

2.1.2 Inclinómetro dinámico

Los inclinómetros dinámicos son más complejos que los inclinómetros estáticos debido a que permiten procesar de buena manera los efectos de la aceleración externa, el ruido y el error inicial del dispositivo, usando un método más avanzado de filtrado de datos y su posterior procesamiento.

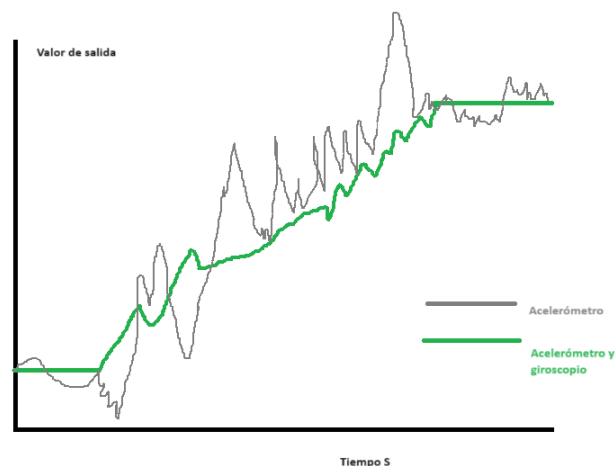


Figura 2. Representación gráfica de un ejemplo de un inclinómetro dinámico donde se muestra el valor de la aceleración y ángulo devueltos por el acelerómetro y giroscopio.

Para las funciones en las que se necesita soportar choques, vibraciones y/o movimientos bruscos con un tiempo de respuesta rápido y una señal con bajo ruido, se suelen usar inclinómetro del estilo dinámico. Estos funcionan mediante la inclusión de dos sensores: uno de aceleración de tres ejes y un giroscopio. El acelerómetro tri-axial es capaz de medir y seguir los movimientos rápidos que sufre la superficie bajo estudio en las tres dimensiones mientras que el giroscopio es responsable de estimar las aceleraciones angulares. Estas señales, las suministradas por el acelerómetro y el giroscopio, se usan para compensar los efectos de la aceleración en el inclinómetro permitiendo que se pueda usar en condiciones de fuertes aceleraciones. La Figura 2 muestra un ejemplo de los resultados devueltos por los dos sensores en un caso de uso normal.

Por último, estos sensores también permiten que el inclinómetro pueda servir para detectar algún movimiento brusco que necesite enviar una señal de aviso.

2.1.3 Parámetros relevantes

En esta subsección se recogen los principales parámetros que definen el funcionamiento de un inclinómetro, describiendo el significado de cada uno de ellos. A continuación, se detallan los parámetros identificados:

- **Tensión de alimentación:** se corresponde con los valores mínimos y máximos con los que pueden ser alimentados para un correcto funcionamiento.
- **Ángulo de medida:** representa el rango de ángulos con respecto al eje usado admite el inclinómetro.
- **Error inicial:** es el valor devuelto por el sensor cuando se posiciona de forma paralela a la dirección de la gravedad.
- **Sensibilidad:** hace mención a la precisión que el sensor presenta para la medición de ángulos.
- **Error por sensibilidad:** es la variación con respecto al resultado real debido a perturbaciones externas.
- **Error por ruido:** es la variación con respecto al resultado real debido al ruido que recibe el sistema.

Tras revisar el principio de operación de estos sensores, esta sección presenta una revisión de los principales sensores comerciales que hay en el mercado. El estudio comparativo se realizará considerando los parámetros más relevantes descritos en la Sección 2.1.3. A estos parámetros, se añadirá el coste económico del sensor ya que se busca implementar un dispositivo de monitorización de salud estructural de bajo coste que pueda ser desplegado de forma masiva a lo largo de un tramo ferroviario completo.

2.2.1 SCA830-D07-1

El SCA830-D07-01, es un inclinómetro de un sólo eje, basado en la tecnología 3D-MEMS del fabricante Murata. Este inclinómetro está diseñado, fabricado y probado para aplicaciones automotrices y es capaz de dar un valor con bajo ruido. Además. Puede emplearse en un gran rango de temperaturas, humedades y ruidos mecánicos, aspectos fundamentales dado que el sistema a diseñar estará sometido a una gran variación de temperatura y humedad. Su encapsulado es del tipo DFL, que lo hace compatible con el montaje SMD. Los datos recolectados se ven en la Tabla 1. Tabla 1. Características del sensor SCA830-D07-1.



Figura 3. Imagen del sensor SCA830-D07-01.

Parámetro	Valor
Tensión de alimentación	3-3.6V
Rango de medida	$\pm 1g // -90^{\circ} _ +90^{\circ}$
Offset	± 30 mg
Sensibilidad	0.03125mg
Error por sensibilidad	-4
Ruido (rms)	0.15
Estilo de montaje	SMD/SMT
Precio	48.63€

Tabla 1. Características del sensor SCA830-D07-1.

2.2.2 MXD6240AU

El MXD6240AU es un inclinómetro del fabricante MEMSIC que tiene 8 umbrales de ángulos que son configurables por el usuario a través de tres pines digitales. Si la orientación del dispositivo con respecto a la

vertical excede el umbral programado, la salida digital del sensor se activa. Este sensor presenta, además, un filtro anti-vibración que atenúa más de 45dB perturbaciones por encima de 25 Hz y más de 60dB, en el caso de vibraciones con frecuencia superior a 50 Hz. Los ángulos contemplados son 40°, 42.5°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65° y 70°. Asimismo, el fabricante garantiza una precisión de $\pm 5^\circ$. Asimismo, el inclinómetro incorpora una funcionalidad de seguridad para detectar un fallo interno. En caso de que se produzca, la salida del sensor se pondrá en alta impedancia. Presenta un encapsulado tipo LCC de 6 pines.

Sus principales características quedan recogidas en la Tabla 2. La Figura 4 muestra una imagen del componente.



Figura 4 Imagen del MXD6240AU.

Parámetro	Valor
Tensión de alimentación	2.7-5 V
Rango de medida	$\pm 5^\circ$
Offset	
Sensibilidad	0.375g
Error por sensibilidad	
Ruido (rms)	
Estilo de montaje	SMD/SMT
Precio	16.26€

Tabla 2. Características del sensor MXD6240AU.

2.2.3 SCL3300-D01-10

El SCL3300-D01-10 es un sensor de alto rendimiento vendido por el fabricante Murata. Es un inclinómetro de tripe eje, con una señal de ángulo de salida basado en la tecnología de 3D-MEMS patentada por el propio fabricante. El procesamiento de la aceleración se hace en el propio circuito integrado. Además, presenta una interfaz de datos flexible, siendo posible configurarla como I2C o SPI para su comunicación con el microcontrolador. Este sensor está diseñado para trabajar en un rango amplio de temperaturas (-50°C a $+50^\circ\text{C}$) y humedad (), así como en entornos sometidos a vibraciones mecánicas. Además, el componente está diseñado para ser compatible para montaje SMD. Los datos recolectados se pueden ver más fácilmente en la Tabla 3 y el dispositivo tendría el aspecto mostrado en la Figura 5.



Figura 5 Imagen del SCL3300-D01-10.

Parámetro	Valor
Tensión de alimentación	3-3. V
Rango de medida	$\pm 90^\circ/2.4\text{g}$
Offset	XZ $\pm 20\text{mg}$ / Y -25_+20

Sensibilidad	182 LSB/°
Error por sensibilidad	0.0018 °/√Hz
Ruido (rms)	0.13 mgRMS
Estilo de montaje	SMD
Precio	53.07 €

Tabla 3. Características del sensor SCL3300-D01-10.

2.2.4 ADIS16203CCCZ

El ADIS16203 es un sistema de medida angular completo diseñado por Analog Devices, Inc. El inclinómetro usa una interfaz de comunicación SPI y tiene un rango de medida que abarca 360°. Además, se caracteriza por medir la temperatura y alimentación para corregir las posibles fuentes de perturbación que puedan afectar a las medidas. Además, con el propósito de reducir el tamaño de los sistemas de monitorización, este sensor incluye una entrada analógica que puede ser monitorizada a través de un registro interno. Para ello, se usa un convertidor analógico-digital de 12 bits. También presenta una salida analógica que el usuario puede emplear para establecer una referencia a otro dispositivo. Para su generación, se emplea un convertidor digital-analógico de 12 bits. Junto a las características anteriores, el sensor incluye registros para almacenar hasta dos calibraciones realizadas por el usuario, permitiendo un mayor control sobre sus capacidades. Los datos más relevantes quedan recogidos en la Tabla 4. El dispositivo se representa en la Figura 6.

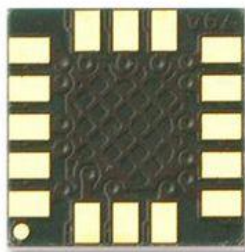


Figura 6 Imagen ADIS16203.

Parámetro	Valor
Tensión de alimentación	3-3.3 V
Rango de medida	360°
Offset	±4 LSB
Sensibilidad	0.037 °/medición
Error por sensibilidad	0.025 °/LSB
Ruido (rms)	1.0 grados,rms
Estilo de montaje	SMD
Precio	56.38€

Tabla 4. Características del sensor ADIS16203CCCZ.

2.2.5 SCL3400-D01-1

El SCL3400-D01-1 es un inclinómetro de doble eje con una obtención del ángulo obtenido por tecnología de clase 3D-MEMS capacitivo. El procesamiento de señal está hecho con una señal mixta ASIC con una interfaz flexible SPI. Todo esto está empaquetado en un encapsulado prefabricado de plástico con doce pines que es compatible con el montaje de tipo SMD y las directivas RoHS y ELV. Aparte está diseñado para ser estable en un amplio rango de vibraciones y temperatura. Los datos clave quedan resumidos en la Tabla 5 y una imagen

del dispositivo se aprecia en la Figura 7.



Figura 7. Imagen de SCL3400-D01-1.

Parámetro	Valor
Tensión e alimentación	3-3,6V
Rango de medida	ModeA(-30°/+30°)
	ModeA(0,5g)
	ModeB(-90°/+90°)
	/ModeB(1,1g)
Error de offset	-4/+4mg
Sensibilidad	A 32768 °/Count / B 16384 °/Count
Error por sensibilidad	-0.7 /+0,7%
Error de ruido	0.0009°/√Hz
RMS	A-> 0.07mgRMS/ B->0.14mgRMS
Precio	86.14€

Tabla 5. Características principales del sensor SCL3400-D01-1.

El SCL3300 tiene un error inicial, ruido y precisión son superiores a los demás sensores excepto el SCL3400 pero incluye un aumento de precio que lo hace mucho menos viable para este fin debido a que un incremento mayor del 50% en el precio que no es cubierto por la mejora en las prestaciones.

Dispositivos	Tensión de alimentación.	Rango de medida	Error inicial	Sensibilidad (°/Medida)	Error de sensibilidad	Densidad de ruido admitida.	RMS	Precio por unidad
SCA830-D07-1	3-3,6	$\pm 1g/-90^\circ \text{---} +90^\circ$	$\pm 30 \text{ mg}$	0.03125mg	-4		0.15	48,63
MXD6240AU	2.7-5	$\pm 5^\circ$		0.375g				16,26
SCL3300-D01-10	3-3,6	$\pm 90^\circ/2.4g$	XZ $\pm 20\text{mg}/$ Y - 25_+20		182 LSB/°	0.0018 °/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.13 mgRMS	53,07€
ADIS16203CCCZ	3-3,3	360°	$\pm 4 \text{ LSB}$	0.037	0.025 °/LSB	0.037	1.0 °rms	56,38
SCL3400-D01-1	3-3,6V	ModeA(-30°/+30°)	-4/+4mg	32768	-0.7 /+0,7%	0.0009°/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.07mgRMS	86,11
		ModeA(0,5g)		32768			0.07mgRMS	
		ModeB(-90°/+90°)		16384			0.14mgRMS	
		/ModeB(1,1g)		16384			0.14mgRMS	
TMS/TMM88(SSEC)	0-10V	360°		0,01°	Typ. $\pm 0,15^\circ$, max. $\pm 0,25^\circ$			300

Tabla 6 Inclinómetros comerciales revisados.

Un acelerómetro es un sensor que mide la aceleración lineal o angular que sufre un dispositivo. Esta función es muy utilizada en campos tan variados como la investigación, fabricación o de forma doméstica como en un teléfono móvil.

Este dispositivo mide la aceleración mediante un objeto en su interior que vibra y al medir dicha vibración se puede extrapolar la medición deseada, esto se usa para diagnosticar sobre el funcionamiento de dispositivos, máquinas o estructuras tales como raíles de tren. Esto conlleva a que para medir vibraciones de baja intensidad se necesite uno de gran precisión por suerte la experiencia previa demostró que el elegido sería adecuado.

El BMA400 es un acelerómetro triaxial, de 12 bits y digital con un chip inteligente integrado e interrupciones provocados por la posición habilidades. Este sensor ya se ha usado en aplicaciones de salud estructural previamente con resultados exitosos.

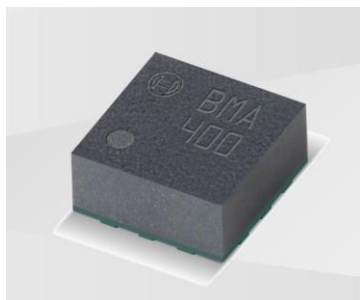


Figura 8 Acelerómetro BMA 400.

	Símbolo	MIN	TYP	MAX	Unidades
Rango de aceleración	g_fs2g		+2		g
	g_fs4g		+4		
	g_fs8g		+8		
	g_fs16g		+16		
Tensión de alimentación	VDD	1.72	1.8	3.6	V
Sensibilidad	S_2g		1024		LSB/g
	S_4g		512		
	S_8g		256		
	S_16g		128		
Sensibilidad por temperatura	TCS		0.025		%/K
Error inicial de G	Off		50		mg
Error inicial de g por temperatura	TCO		1		Mg/K
Salida de ruido externo	Nrms		180		μg/√Hz
			240		

Tabla 7. Características principales del sensor BMA400.

Tras el estudio realizado en las secciones previas sobre los dispositivos comerciales existentes en la actualidad para estimar la inclinación y aceleración a la que está sometida un sistema, se ha seleccionado los inclinómetro SCL3300 y el acelerómetro BMA400. Cabe resaltar que este último sensor ha sido seleccionado dada la experiencia previa que se tiene con su uso en aplicaciones de salud estructural ya que su resolución y precisión son adecuadas.

3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN ADQUIRIDA

A la hora de procesar los datos generados por los sensores elegidos en la sección anterior, es necesario realizar un conjunto de operaciones que permitan obtener la magnitud requerida con la precisión que recoge la hoja de explicación del sensor. En este capítulo, se describen los principales algoritmos para obtener la inclinación a partir de la información dada por el fabricante del sensor SCL3300-D01-10, [2].

El funcionamiento del sensor se ve afectado por la temperatura del ambiente en el que el sensor se encuentra insertado. Por tanto, es necesario una medición de la temperatura para compensar la información generada por el sensor. De acuerdo a la hoja de datos, la temperatura se puede estimar respecto a la ecuación:

$$T[^{\circ}C] = -273 + \left(\frac{Temp}{18.9}\right)$$

donde Temp es el contenido del registro del sensor en sistema decimal.

Una vez determinada la temperatura a la que está el dispositivo trabajando, es necesario estimar la desviación que puede presentar la medida tomada debido a la temperatura ambiental. Para ello, se pueden consultar en la Figura 9, Figura 10 y Figura 11.

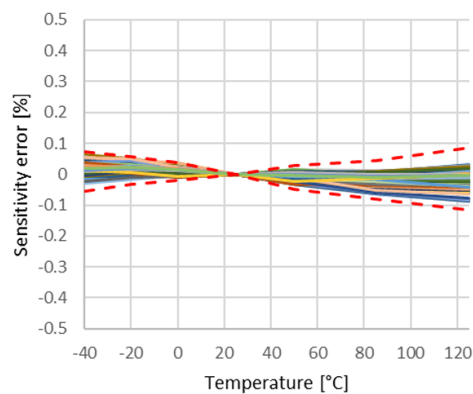


Figura 9. Dependencia con la temperatura del error en la medida del eje X, [3].

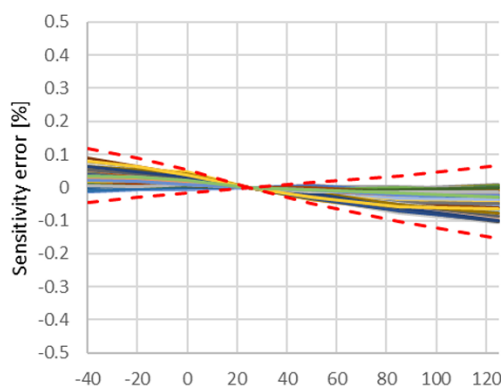


Figura 10. Dependencia con la temperatura del error en la medida del eje Y, [3].

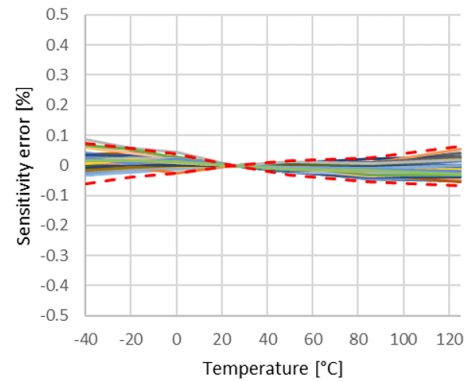


Figura 11. Dependencia con la temperatura del error en la medida del eje Z, [3].

Teniendo como datos de base las aceleraciones en las tres dimensiones para volver los ángulos se usan las siguientes ecuaciones:

$$ANG_X = \operatorname{atan2}\left(\frac{accx}{\sqrt{accy^2 + accz^2}}\right)$$

$$ANG_Y = \operatorname{atan2}\left(\frac{accy}{\sqrt{accx^2 + accz^2}}\right)$$

$$ANG_Z = \operatorname{atan2}\left(\frac{accz}{\sqrt{accx^2 + accy^2}}\right)$$

Siendo $accx$, $accy$ y $accz$ las aceleraciones en las tres dimensiones y ANG_X , ANG_Y , y ANG_Z son los ángulos de salida registrados en formato de 16 bit.

Conversión de ángulos a $^{\circ}$ con la siguiente ecuación:

$$Angle[^{\circ}] = \frac{d'Ang_{\%}}{2^{14}} * 90$$

donde “ $d'Ang_{\%}$ ” es el ángulo medida y representado en formato decimal (ANG_X , ANG_Y , ANG_Z).

4 DISEÑO DEL DISPOSITIVO

En esta sección, se describe el proceso de diseño e implementación del nodo sensor que se empleará para monitorizar la salud estructural de los raíles que componen las vías ferroviarias. Este sistema estará compuesto por una etapa de potencia, un microcontrolador y los sensores seleccionados en la Sección 2. Cabe destacar que la etapa de potencia tomará la energía de una batería Li-ION en formato 18650. Además, con el propósito de minimizar el consumo de potencia del sistema, se emplearán reguladores de baja corriente quiescente y con señales de habilitación que permitan desconectar partes del nodo.

La Figura 12 muestra los distintos elementos que componen el sistema. En este diagrama, los subsistemas están divididos en los siguientes bloques:

1. **Etapa de potencia:** esta etapa está compuesta por un circuito integrado responsable de cargar y gestionar la potencia procedente de la batería y dos reguladores lineales de baja tensión de *dropout*.
2. **Sensores:** este bloque está formado por los sensores seleccionados en el capítulo 2 por un acelerómetro BMA400 y un inclinómetro SCL3300-D01-10
3. **Microcontrolador:** será el responsable de controlar y gestionar los elementos anteriores para minimizar el consumo de potencia y de procesar los datos obtenidos por los sensores para su posterior envío.

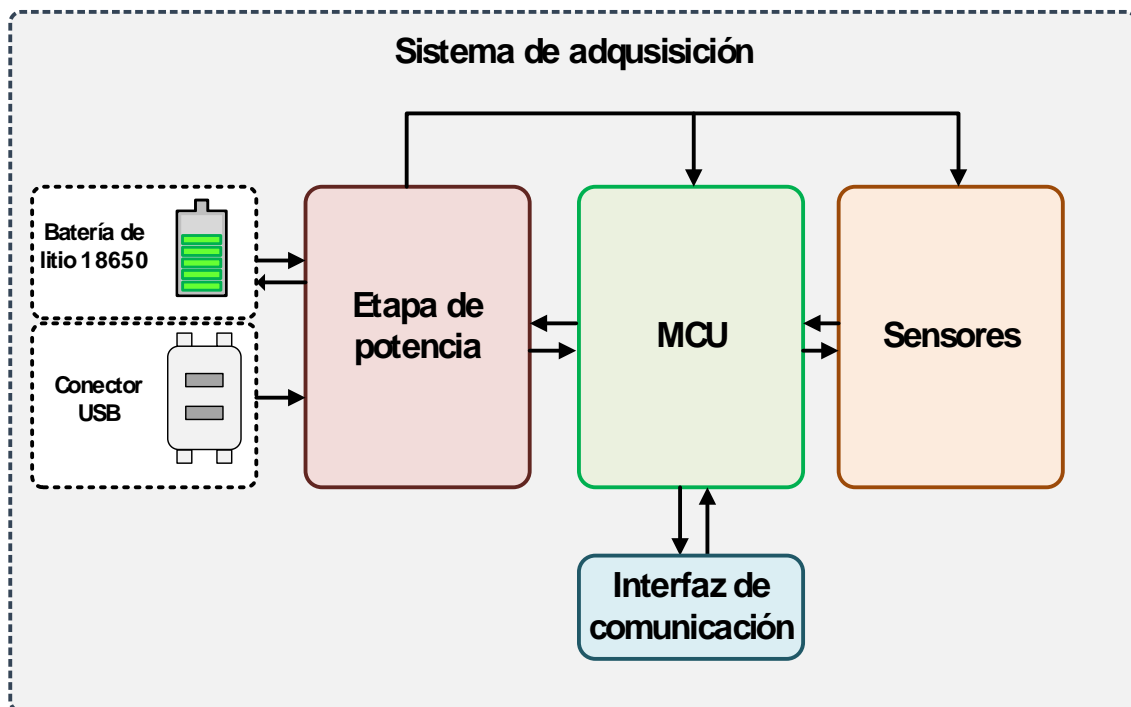


Figura 12. Diagrama de bloques del sistema de monitorización implementado.

4.1.1 Etapa de potencia

Como se ha indicado anteriormente, la etapa de potencia está compuesta por un circuito cargador de batería y dos reguladores lineales de baja tensión de *dropout*. Se ha seleccionado dos reguladores lineales con el propósito de reducir el ruido en la tensión de alimentación de los sensores y poder tener mayor precisión. Esta etapa de potencia puede ser alimentada a través de la batería o de un cable USB, que actuará como puerto de carga. Asimismo, el cargador de batería seleccionado, cuyas principales características se recogen en la Tabla 8, presenta una interfaz de comunicación I2C para configurar el esquema de carga a seguir y conocer

información relevante sobre su operación. La Figura 13 muestra un diagrama de bloques simplificado de la etapa de potencia y las conexiones que presenta.

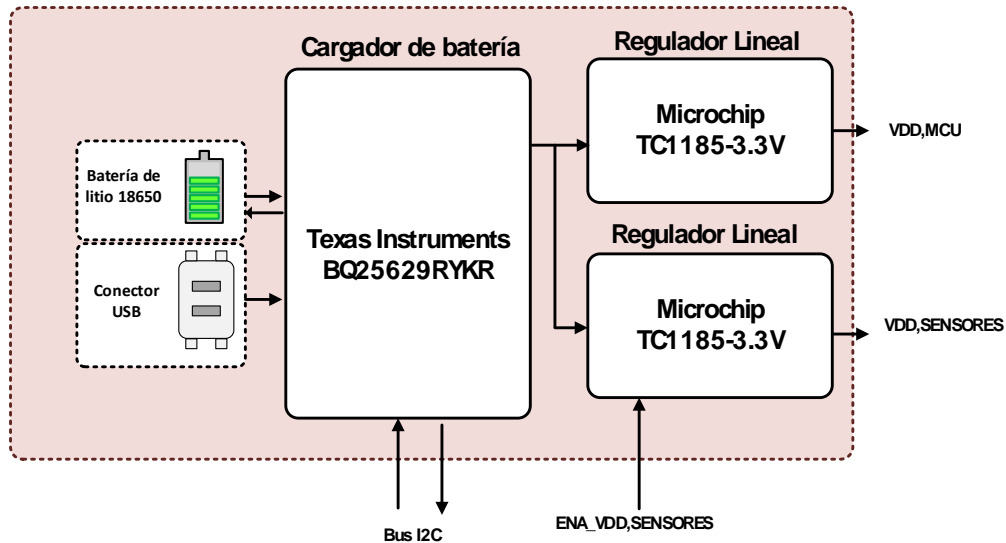


Figura 13. Diagrama de bloques que muestra la implementación de la etapa de potencia.

El componente principal de la etapa de potencia se corresponde con el circuito integrado BQ25629KYKR del fabricante Texas Instruments.

Parámetro	Valor
Tensión de entrada	3.9-18V
Tensión de carga programable	3.5-4.8V
Entrada de configuración	I2C
Detección de USB	Sí
Corriente de batería	1.5 μ A
Rango de Tensión OTG	3.84-5.2V
Tamaño de empaquetado	2.5x3mm

Tabla 8. Tabla de característica del dispositivo Texas Instruments BQ25629RYKR.

Los reguladores lineales se corresponden con el modelo TC1185-3.3VCT713, suministrado por el fabricante Microchip. Estos reguladores se caracterizan por presentar una tensión de entrada comprendida entre 2.7V y 6V, bajo ruido y una baja corriente quiescente. Este último parámetro es importante para maximizar el tiempo de vida de la batería. La Tabla 9 recoge las principales características de este componente.

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Tensión de entrada	2.7		6	V
Regulación de línea		0.05	0.35	%
Regulación de carga		0.05	2	%
		0.05	3	
Corriente quiescente		50	80	μ A

Tabla 9. Características del regulador lineal TC1185-3.3VCT713

4.1.2 Sensores

Tal y como se ha descrito en el Capítulo 2 de la presente memoria, los sensores empleados son un acelerómetro BMA400 y un inclinómetro SCL3300-D01-10. A nivel de implementación, se ha optado por

hacer independiente la tensión de alimentación de los sensores para, de esa forma, poder desconectarla y eliminar el consumo estático que puedan introducir cuando no están funcionando. Esto permitirá alargar la duración de la batería incluida en el sistema.

Asimismo, cabe indicar que el acelerómetro emplea una interfaz de comunicación de tipo I2C, mientras que el inclinómetro SCL3300, incorpora una interfaz SPI. La Figura 14 muestra un diagrama de bloques del bloque de sensores.

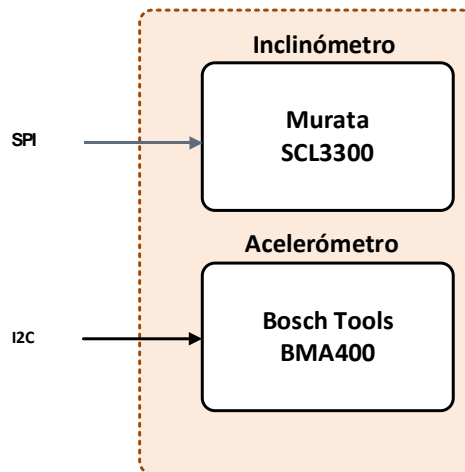


Figura 14. Diagrama de bloques del módulo de sensores integrado en el sistema de monitorización.

4.1.3 Microcontrolador

Para esta aplicación, el microcontrolador seleccionado se corresponde con el dispositivo STM32L432 del fabricante STMicroelectronics. Es un microcontrolador de baja potencia consumida basado en una arquitectura Arm® Cortex®-M4 32-bit tipo RISC. Este circuito opera a una frecuencia de 80 MHz. Además, incluye 256kB de memoria de programa junto a 64kB de memoria SRAM. Esto permite que pueda configurarse un sistema operativo de tiempo real como puede ser FreeRTOS.

Modelo		STM32L432Kx
Memoria Flash		256KB
SRAM		64KB
Quad-SPI		Sí
Temporizadores	Control avanzado	1 (16 bit)
	Propósito general	2 (16 bit)
		1 (32 bit)
	Básico	2 (16 bit)
	Baja potencia	2 (16 bit)
	SysTick Temporizador	1
Interfaces de comunicación	Watchdog timers	2
	SPI	2
	I2C	2
	USART	2
	LPUART	1
	SAI	1
	CAN	1
	USB FS	Sí
SWPMI	Sí	

Tabla 10. Especificaciones del dispositivo STM32L432KCU (I).

RTC	Sí
GPIOs	26
Pin de despertar	2

ADC de 12 bits	1
Número de ADCs	10
Canales de DAC 12 bits	2
Frecuencia de CPU máxima	80 MHz
Tensión de operación	1.71 a 3.6V

Tabla 11. Especificaciones del dispositivo STM32L432KCU (II).

A continuación, se recoge la asignación de pines realizada en el presente proyecto. La Tabla 12 recoge los pines empleados para comunicarse con el sensor BMA400.

Pin	Función	Nombre
20	Bus SDA.	I2C_SDA
19	Bus SCL.	I2C_SCL
6	Interrupción.	INT1
7	Interrupción.	INT2

Tabla 12. Asignación de los pines para el sensor BMA400.

En la Tabla 13, se muestran los pines empleados para implementar la interfaz de comunicaciones SPI para el sensor SCL3300.

Pin	Función	Nombre
10	MOSI	MOSI
11	MISO	MISO
12	Reloj	SCK
13	CSN	CSN

Tabla 13. Asignación de los pines para el sensor SCL3300.

Para el control de la etapa de potencia, la Tabla 14 recoge los pines empleados del microcontrolador.

Pin	Función	Nombre
20	Bus SDA.	I2C_SDA
19	Bus SCL.	I2C_SCL
28	Interrupción.	BQINT
8	Enable del LDO.	ENA_VDD_SENSOR

Tabla 14. Asignación de los pines elegidos para el control y supervisión de la etapa de potencia.

Pin	Función	Nombre
4	Botón de reset	NRST
2	Conexión con el reloj	OSC32_IN
3	Conexión con el reloj	OSC32_OUT
23	Conexión al programador	SWDIO
24		SWCLK
29	Conexión I2C	I2C1_SCL
30		I2C1_SDA
14	Pines de pruebas	PB0
15		PB1

Tabla 15 Pines restantes usados por el microcontrolador.

Finalmente, la Tabla 15 describe el resto de los pines usados para la gestión del resto de conexiones y dispositivos incluidos en la tarjeta.

En este apartado, se describe la creación del esquemático en el programa CircuitMaker de la compañía Altium.

Para implementar este esquemático, se seguirá la organización descrita en la sección anterior. Además, con el propósito de organizar la comprensión del esquemático, se ha hecho uso de una organización jerárquica. Para ello, cada uno de los bloques se han organizado en módulos (denominados *sheets* en CircuitMaker), tal y como se muestra en la Figura 15.

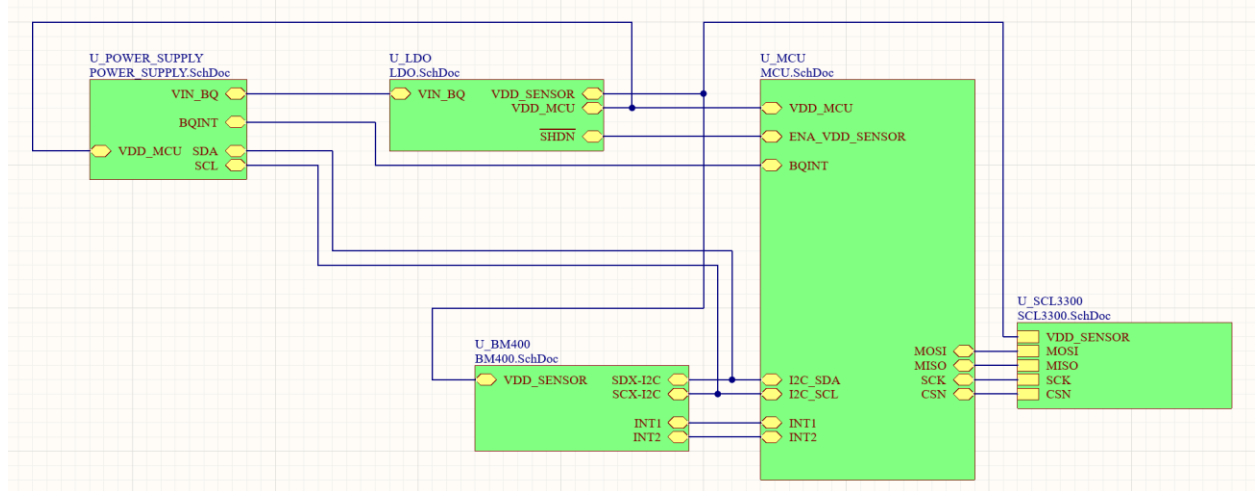


Figura 15. Sistema completo del esquemático en formato de bloques.

Los siguientes subapartados muestran el diseño de cada uno de los módulos.

4.2.1 Microcontrolador

A la hora de configurar el microcontrolador, se han seguido los siguientes criterios:

- Se requiere un reloj de baja frecuencia para el correcto funcionamiento del reloj de tiempo real. La frecuencia de este reloj será de 32.768 kHz.
- El microcontrolador hará uso del reloj interno de alta frecuencia para su funcionamiento. Esto provoca que no sea necesario añadir un cristal adicional

Asimismo, para el resto de los elementos, tales como capacidades de desacoplo, configuración de los modos de funcionamiento o generación de la tensión de alimentación del bloque analógico, se seguirán las recomendaciones ofrecidas por el fabricante en su hoja de aplicación para maximizar el rendimiento del dispositivo [7].

Por ejemplo, las capacidades de desacoplo que permiten estabilizar la tensión de alimentación, condensadores C9, C15, C17, C18 y C20, se han seleccionado para minimizar las fluctuaciones en los diferentes raíles de alimentación. En ningún caso, el valor usado supera la recomendación dada por el fabricante. Asimismo, aquellas tensiones que alimenten los bloques analógicos del microcontrolador incluyen un filtro LC con el objetivo de reducir las contribuciones del ruido por conmutación que genera el bloque digital. La inductancia se ha implementado empleando una ferrita, cuyo valor se ha determinado de forma que se rechace el ruido a partir de una frecuencia superior a 100 MHz. El esquemático resultante se muestra en la Figura 16.

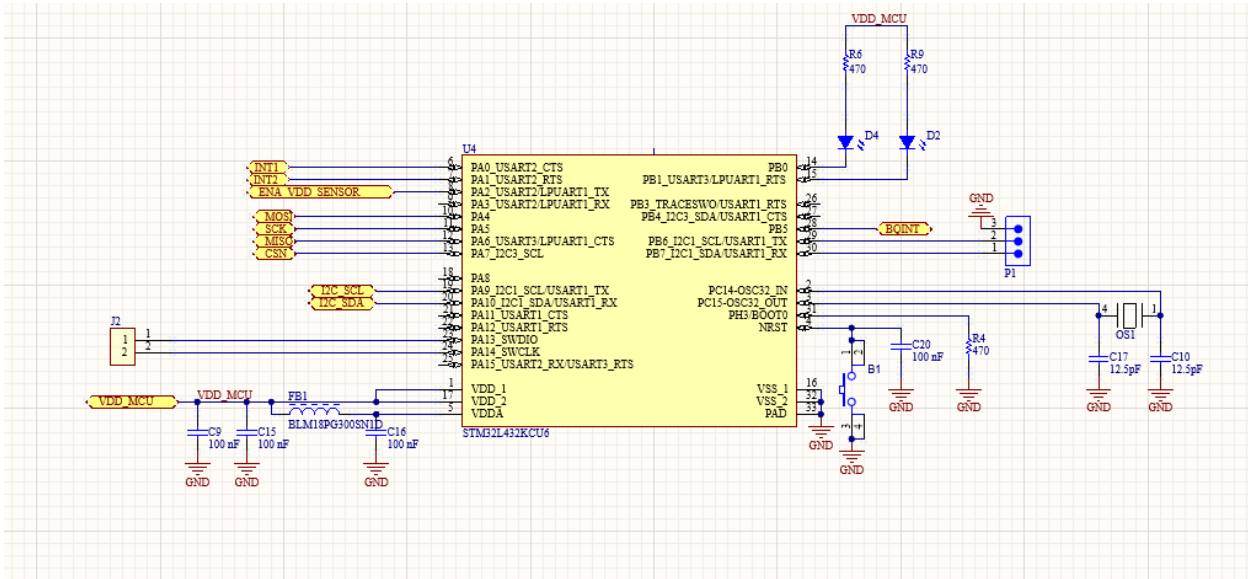


Figura 16. Esquemático del microcontrolador.

4.2.2 Reguladores lineales

A la hora de configurar los reguladores lineales, se han seguido las recomendaciones dada por el fabricante en su hoja de aplicación [8] para minimizar el ruido de los componentes y lograr estabilizar su respuesta. Asimismo, dado que los reguladores elegidos dan una tensión fija, no es necesario introducir una red de realimentación externa, simplificando el diseño completo del sistema. Las conexiones de estos componentes se muestran en la Figura 17.

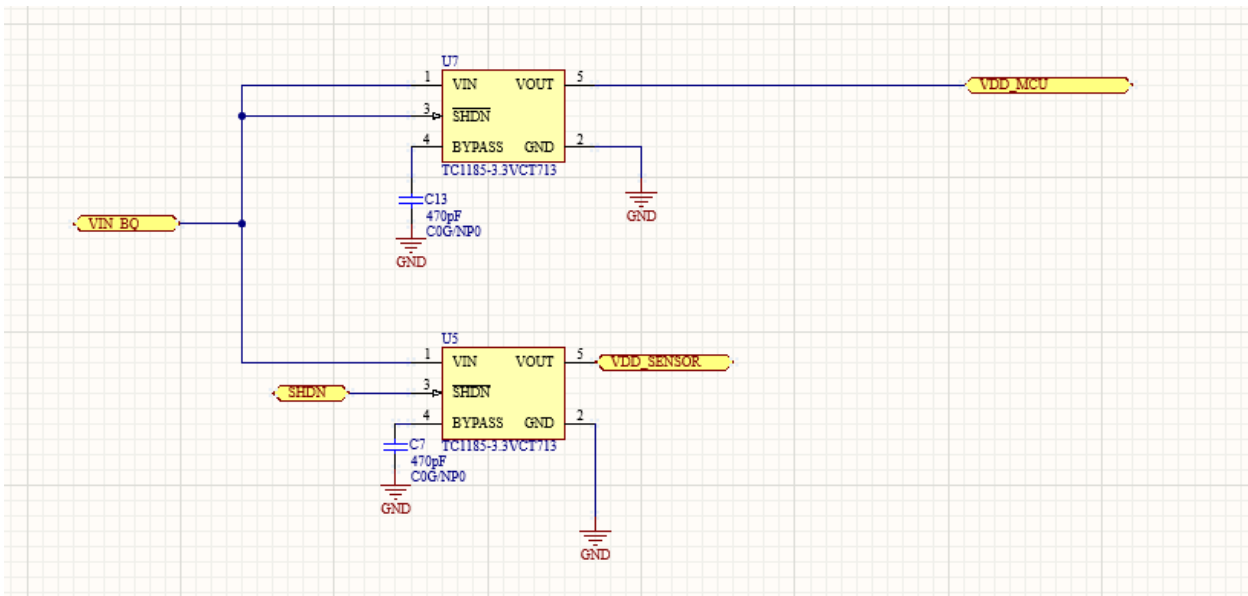


Figura 17. Esquemático de los reguladores lineales empleados.

4.2.3 Acelerómetro

Debido a que este componente es digital, su conexionado se simplifica en gran medida. Tan sólo requiere capacidades de desacoplo en las líneas de alimentación del sensor. El valor se estableció a 100nF, atendiendo a los valores recomendados por el fabricante [9]. Finalmente, las resistencias de pull-up requeridas para el funcionamiento de la interfaz I2C se fijaron en 4.7 k Ω para soportar las diferentes velocidades que implementa la interfaz I2C.

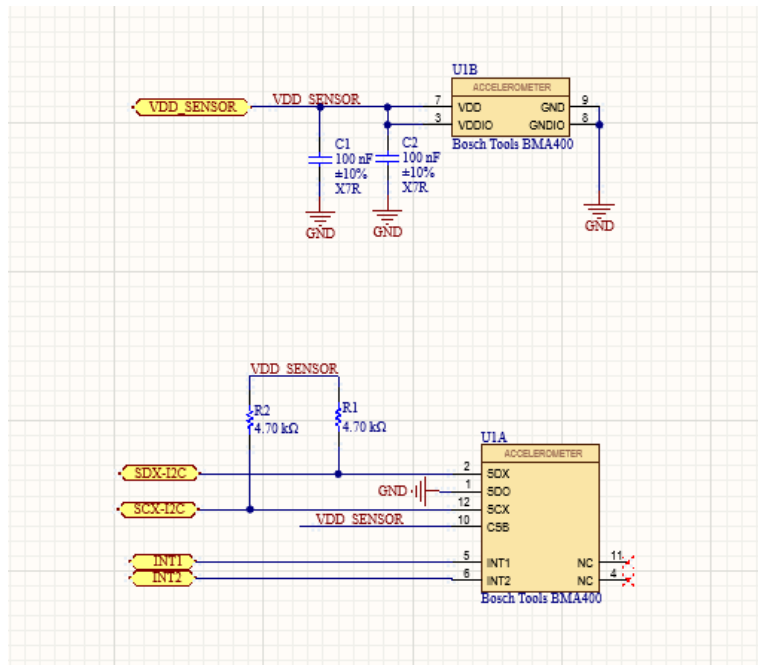


Figura 18. Esquemático del acelerómetro BMA400.

4.2.4 Inclinómetro

Al igual que en la sección anterior, debido a que se corresponde con un sensor digital, sólo requiere añadir las capacidades de estabilización de la tensión de alimentación. Estas se han seleccionado de acuerdo al hoja de características del fabricante.

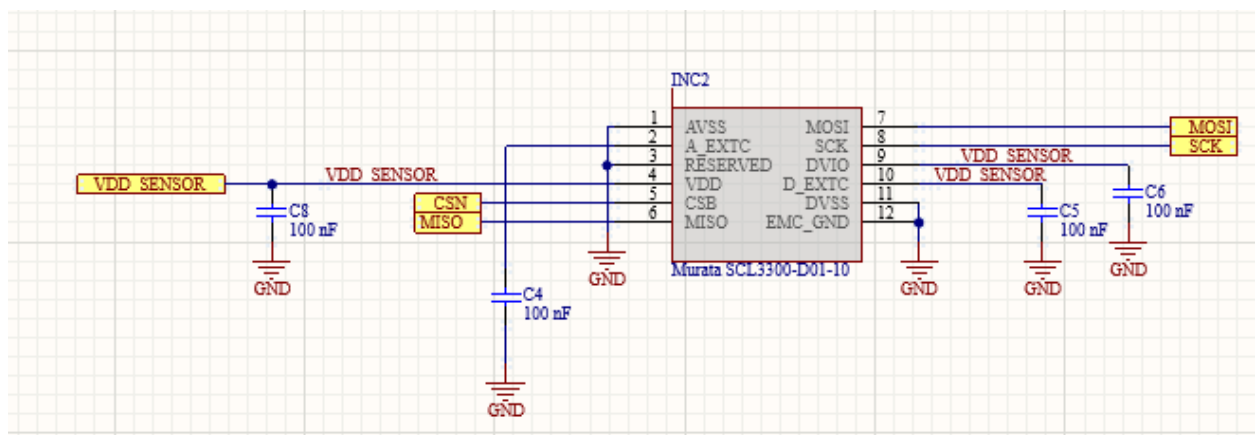


Figura 19. Esquemático del inclinómetro SCL3300.

4.2.5 Cargador de batería

A la hora de diseñar el cargador de batería, se han contemplado las restricciones impuestas por el diseño. En este caso, el uso de una batería de ion-litio de tipo 18650, la necesidad de recargarla a través de un puerto USB y un ultra bajo consumo quiescente. Cabe indicar que la recarga a través del puerto USB se debe a la necesidad de facilitar la operación y manejo del sistema de adquisición diseñado.

El primer paso para diseñar el circuito corresponde con la elección de la inductancia de la etapa de potencia. Esta se debe seleccionar en función de la frecuencia de conmutación esperada, el ciclo de trabajo, el rizado de la corriente esperado y la tensión de entrada (para el presente trabajo, se corresponde con 5V ya que es la tensión nominal dada por un puerto USB). Por tanto, la inductancia se calcula como

$$L = \frac{V_{BUS} \cdot D \cdot (1 - D)}{f_s \cdot I_{RIZADO}}$$

Donde $V_{BUS}=5V$, D es 0.5 aproximadamente y el rizado de la corriente equivale a un 30% de la corriente máxima de carga soportada, $I_{MAX}=2A$. Además, la frecuencia de conmutación está fijada en 1.5MHz. Considerando estos valores, la inductancia $L=1\mu H$. Asimismo, los valores de las capacidades de entrada y salida se han estimado como 10 μF , debido a que el componente está optimizado para hacer uso de estos valores.

Asimismo, se ha incluido un termistor NTC, fabricado por la empresa Vishay, para garantizar una carga segura de la batería. El termistor empleado presenta una resistencia de 10 $k\Omega$, valor recomendado por el fabricante. Este será empleado por el propio circuito integrado para ajustar la corriente de carga en caso de detectar un incremento excesivo de la temperatura de la batería. Es importante destacar que los umbrales empleados para determinar esta condición son programables por el usuario a través de la interfaz I2C. Los valores de la resistencia R16 y R17 se han determinado como

$$R17 = \frac{R_{TH}^{0^{\circ}C} \cdot R_{TH}^{60^{\circ}C} \cdot \left(\frac{1}{V_{TS}^{0^{\circ}C}} - \frac{1}{V_{TS}^{60^{\circ}C}} \right)}{R_{TH}^{60^{\circ}C} \cdot \left(\frac{1}{V_{TS}^{60^{\circ}C}} - 1 \right) - R_{TH}^{0^{\circ}C} \cdot \left(\frac{1}{V_{TS}^{0^{\circ}C}} - 1 \right)}$$

$$R16 = \frac{\frac{1}{V_{TS}^{0^{\circ}C}} - 1}{\frac{1}{R17} + \frac{1}{R_{TH}^{0^{\circ}C}}}$$

Considerando el termistor elegido, los valores de R17 y R16 son 5.3 $k\Omega$ y 30.1 $k\Omega$, respectivamente.

El resto de los componentes, se han seleccionado para maximizar las prestaciones del cargador de batería y su respuesta en frecuencia. En el caso del diodo LED para indicar el estado del cargador, se ha elegido una resistencia de polarización que permita reducir el consumo quiescente lo máximo posible mientras el diodo LED presenta una luminosidad adecuada.

Finalmente, la Figura 20 muestra el esquemático diseñado para integrar este elemento.

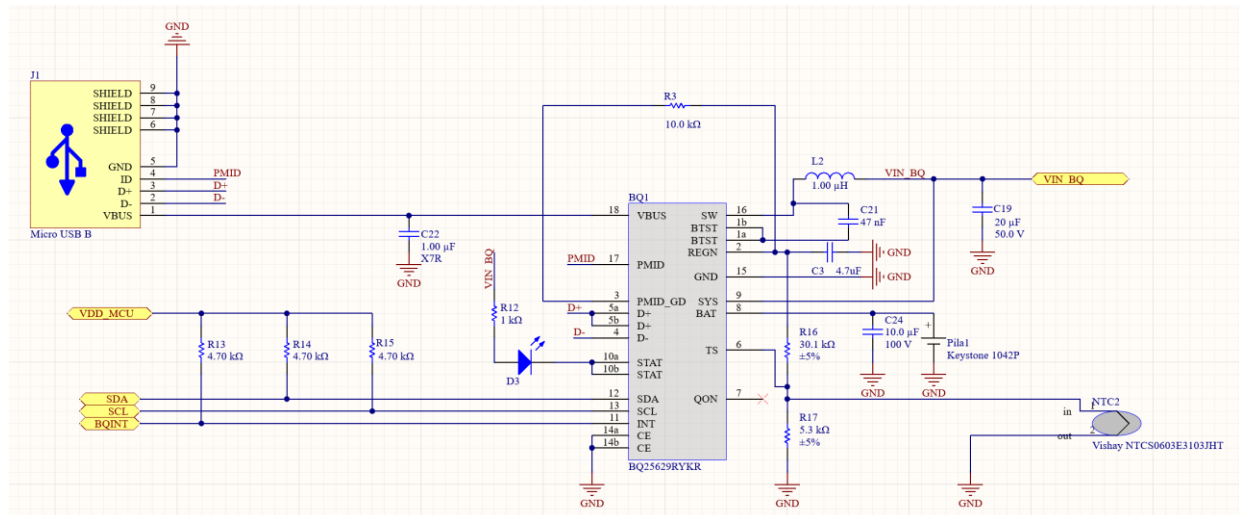


Figura 20. Esquemático del cargador de batería BQ25629RYKR.

Tras finalizar el diseño del esquemático, se ha procedido a generar la tarjeta impresa que haga de soporte físico del sistema diseñado. Para ello, se ha optado por seleccionar un *stack-up* de 4 capas. Este número de capas se ha seleccionado por los siguientes motivos:

- Mejorar la integridad de señal.
- Reducir las posibles emisiones electromagnéticas del circuito.
- Facilitar el conexionado de los componentes.

La distribución de las capas, así como los parámetros que definen el *stack-up* seleccionado se muestran en la Figura 21. Como se puede observar, la capa Top y Bottom se han destinado para rutar las pistas de señal. La capa 2 se ha destinado a un plano de tierra que garantice un buen retorno de corriente, que minimice las interferencias y ruido. Por último, la capa 3 se destinará a distribuir las diferentes tensiones de alimentación empleadas.

	Top Overlay		Overlay			
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.4mil	3.5
1	Top Layer		Signal	1oz	1.4mil	
	Dielectric 2	PP-006	Prepreg		2.8mil	4.1
						0.02
2	GND	CF-004	Plane	1oz	1.378mil	
	Dielectric 3	PP-006	Prepreg		2.8mil	4.1
						0.02
3	VDD	CF-004	Signal	1oz	1.378mil	
	Dielectric 1	FR-4	Dielectric		12.6mil	4.8
4	Bottom Layer		Signal	1oz	1.4mil	
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.4mil	3.5

Figura 21. *Stack-up* seleccionado para implementar la tarjeta impresa.

A la hora de diseñar la tarjeta impresa, se ha definido sus dimensiones para que pueda ser ubicado en el interior de una vía ferroviaria. Por este motivo, el alto de la tarjeta se ha fijado en 7 cm. Sin embargo, dada la forma de los raíles, el ancho no presentaba ninguna restricción. Aún así, se ha optado por minimizar su tamaño.

El siguiente paso, consistió en distribuir los componentes sobre el PCB de forma que se favoreciera su interconexión y se facilitara el acceso a aquellos componentes que requieren de conexión externa, como puede ser el USB o los diodos LEDs de depuración. Por tanto, el criterio seguido a la hora de distribuir los componentes ha sido:

- Componentes que requieren interconexión: se ha ubicado en la periferia.

- Se han agrupado los componentes de acuerdo con su funcionalidad, distanciando aquellos que puedan verse afectados por las emisiones de otros como, por ejemplo, los sensores.
- La batería se ha colocado en un extremo para facilitar su accesibilidad y manipulación.

Una vez finalizado la distribución de los componentes, se procedió a su rutado. Para ello, se han ajustado los anchos de pista en función de la corriente que debe circular por ellas.

A continuación, la Figura 22, Figura 23, Figura 24 y la Figura 25 muestran una vista detallada de cada una de las capas rutadas. En ellas, se puede observar cómo se han aplicado los criterios anteriormente fijados. Cabe destacar que las cruces de color morado que aparecen en las capas se corresponden con indicaciones visuales que el programa de diseño empleado utiliza para representar conexiones al plano de tierra (capa 2). Esto se debe a que dicha capa se representa de forma negativa, es decir, la ausencia de color se corresponde con la presencia de cobre. Aquellas zonas coloreadas muestran las regiones del plano que no presentan cobre.

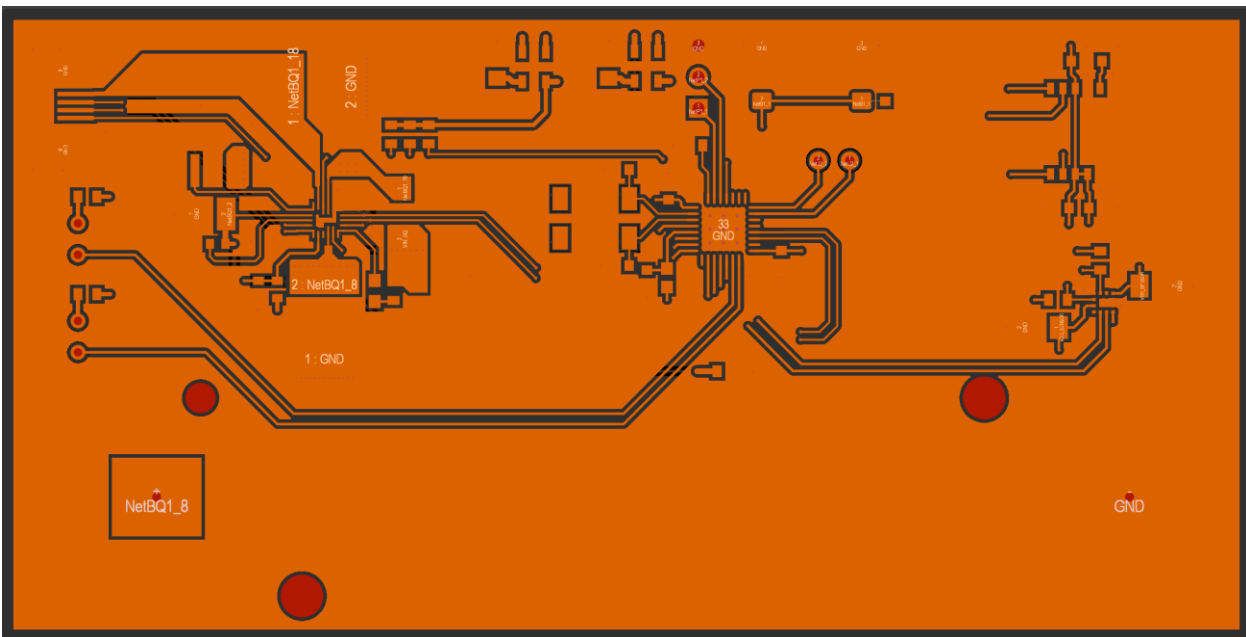


Figura 22. Top de la tarjeta diseñada (capa 1).

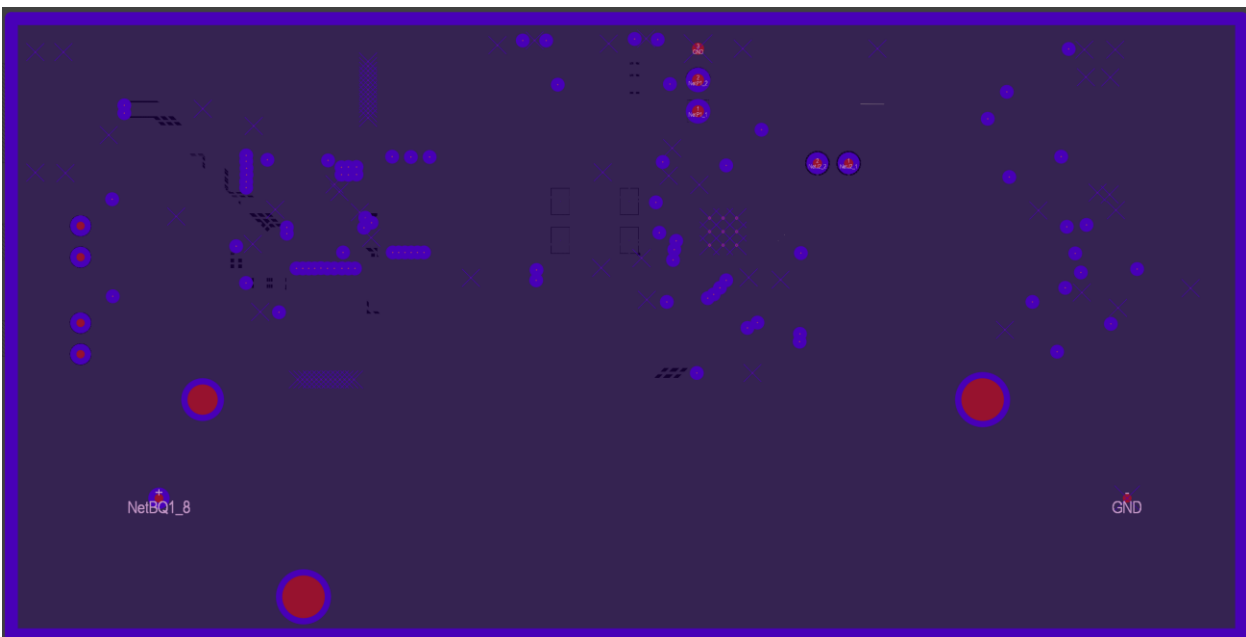


Figura 23. Plano de tierra de la tarjeta diseñada (capa 2).

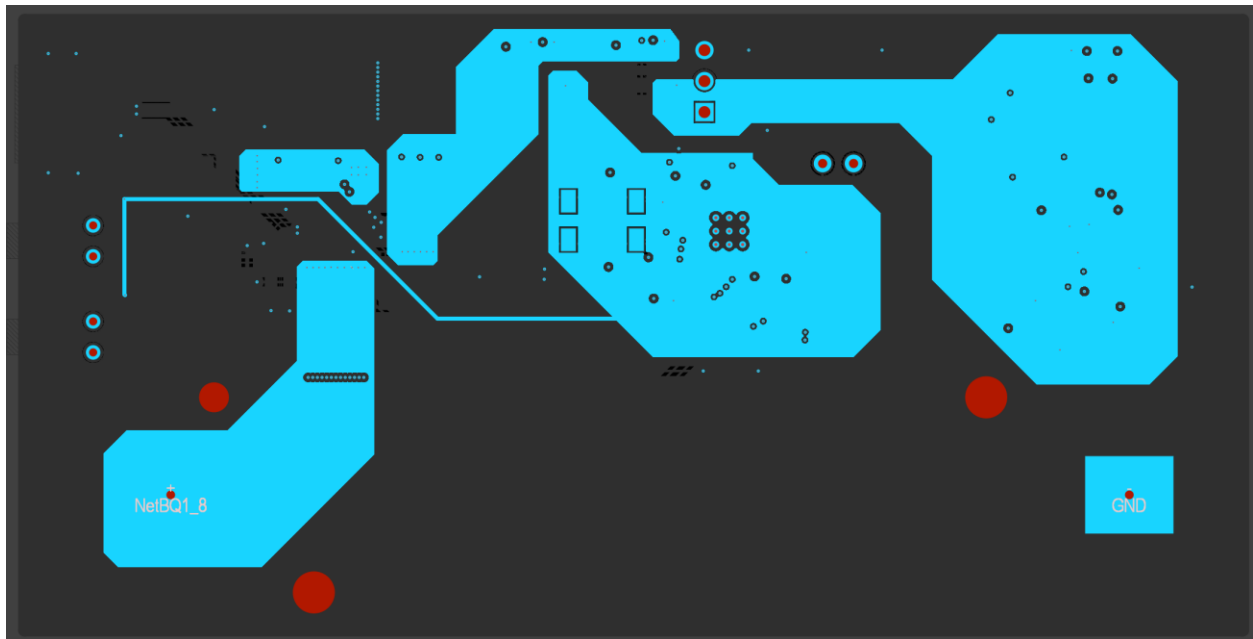


Figura 24. Planos de alimentación incluidos en la tarjeta diseñada (capa 3).

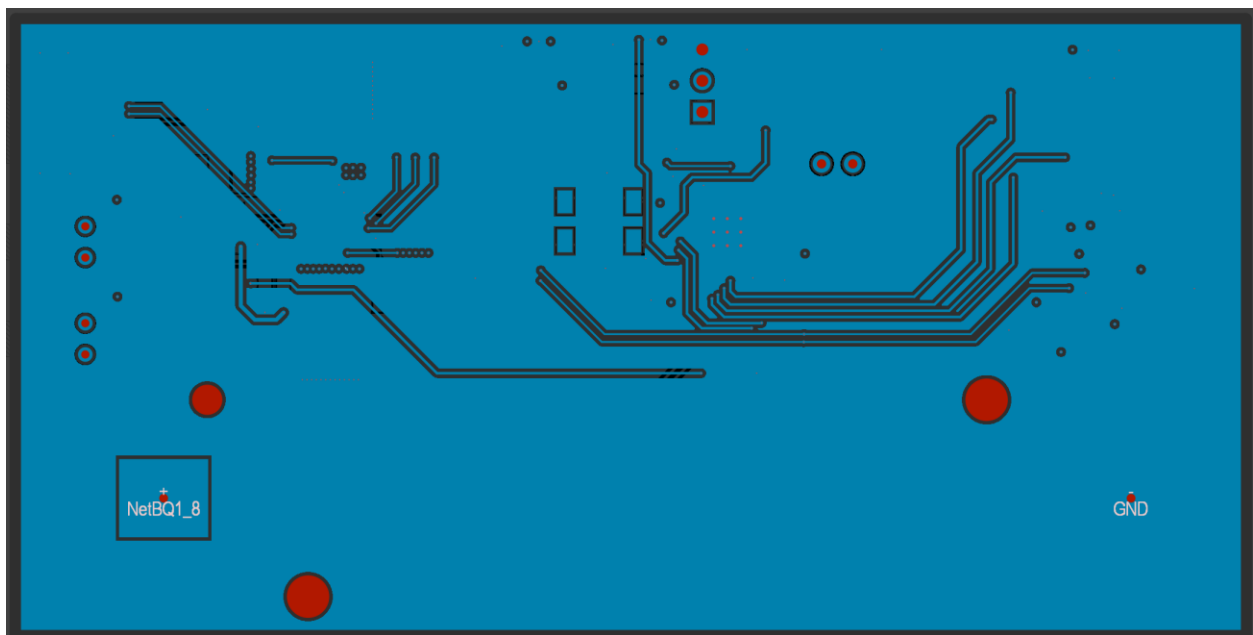


Figura 25. Bottom de la tarjeta diseñada (capa 4).

Por último, la Figura 26 muestra una vista en 3D del prototipo implementado, mientras que la

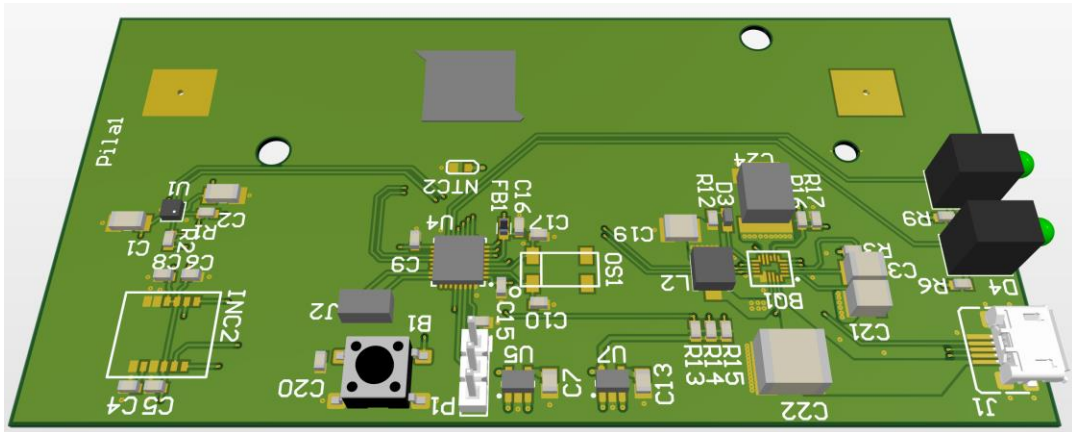


Figura 26. Vista 3D de la tarjeta impresa diseñada.

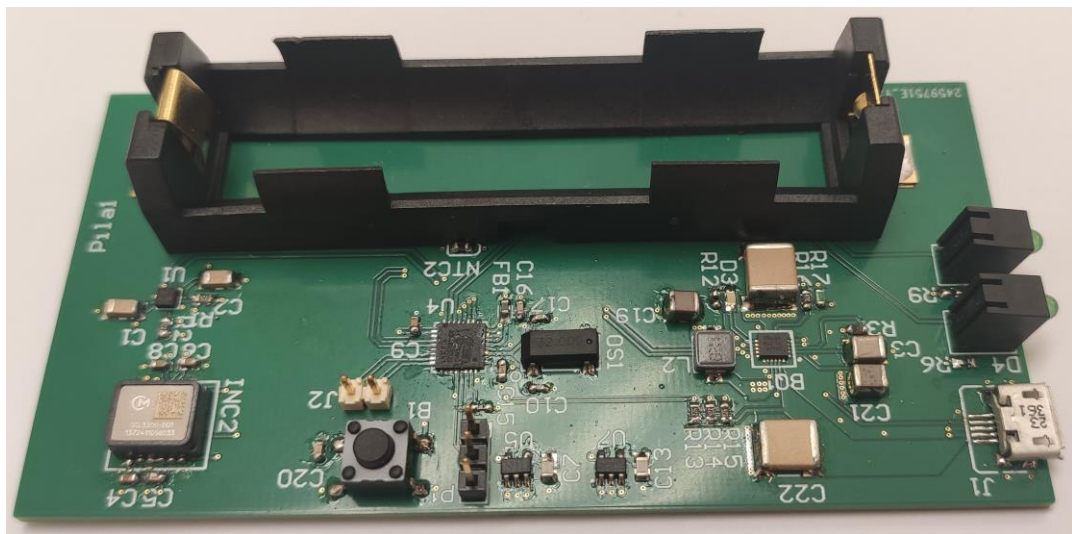


Figura 27. Imagen de la tarjeta fabricada y ensamblada.

5 TEST ELÉCTRICO DEL PCB

A la hora de validar una tarjeta impresa es necesario realizar una serie de comprobaciones que permitan validar su correcto funcionamiento a nivel eléctrico y funcional. Tras ello, será necesario realizar un conjunto de pruebas que determinen sus prestaciones. Este último conjunto de pruebas excede el alcance del presente Trabajo Fin de Grado. No obstante, se dejan recogidas las pruebas que serían necesario realizar para este fin.

Por último, la Tabla 16 recoge el conjunto de pruebas propuestos en este trabajo junto con su grado de consecución (realizada, pasada o no, y propuesta). Las siguientes subsecciones de este capítulo detallan cada una de las pruebas.

Prueba	Descripción
Inspección física	Es una revisión visual de la placa para buscar imperfecciones, revisar por fallas mecánicas y daños o rayones.
Pruebas eléctricas	Corresponde a un conjunto de pruebas que permita garantizar que el sistema diseñado opera dentro de las especificaciones de diseño.
Pruebas funcionales	Están enfocadas a validar el funcionamiento del sistema, es decir, garantizan que el sistema de adquisición logra operar como se espera, generando la información esperada.
Pruebas de rendimiento	Este conjunto de pruebas está destinado a validar las prestaciones del sistema.

Tabla 16. Batería de pruebas realizadas para validar la tarjeta.

Este conjunto de pruebas se corresponde con el primer paso a la hora de evaluar y validar la carga útil implementada. Su finalidad es identificar posibles defectos y asegurar que tanto la calidad como los requisitos de fabricación cumplen con las especificaciones requeridas por el proyecto. Por tanto, las pruebas de inspección física deben ser las primeras medidas que deben efectuarse en el proceso de validación de una tarjeta impresa. A continuación, se detallan los puntos que deben evaluarse.

5.1.1 Revisión de los componentes

Estas pruebas persiguen validar que todos los componentes que constituyen la tarjeta impresa se encuentran colocados en la orientación correcta y están dentro de las tolerancias admisibles del proceso de fabricación para evitar posibles cortocircuitos que lleven a la destrucción de la tarjeta impresa implementada. Además, se validará que la referencia y/o valor del componente se corresponde con aquellos que se han indicado en los esquemáticos. También será vital revisar que aquellos componentes que no deben soldarse no estén presentes en el prototipo final.

Para su evaluación será necesario emplear lentes y/o microscopios de alta resolución que permitan visualizar con claridad las soldaduras realizadas.

El resultado de la prueba debe ser un informe donde se detallan aquellos terminales que presentan problemas. En caso de no detectar ningún problema, el conjunto de pruebas realizado se evaluará como correcto.

5.1.2 Verificación de la calidad de las soldaduras

Estas pruebas están destinadas a garantizar que todas las soldaduras realizadas son adecuadas y no presenten defectos como soldaduras frías o desalineamiento de los componentes soldados que puedan provocar un cortocircuito.

Para su evaluación será necesario emplear lentes y/o microscopios de alta resolución que permitan visualizar con claridad las soldaduras realizadas.

El resultado de la prueba debe ser un informe donde se detallen aquellos terminales que presentan problemas. En caso de no detectar ningún problema, el conjunto de pruebas realizado se evaluará como correcto.

Las pruebas eléctricas están destinadas a validar el correcto funcionamiento del sistema, asegurando que no existe ningún tipo de mal funcionamiento que pueda provocar un fallo catastrófico del sistema. En estas pruebas no se persigue contrastar las prestaciones de sistema diseñado, si no garantizar que todos los elementos se encuentran polarizados dentro de los valores para los que han sido diseñados. Por tanto, el conjunto de pruebas a realizar estará destinado a validar los niveles de tensión y corriente de los diferentes subsistemas que componen la carga útil.

A continuación, se detallan los puntos que deben revisarse.

5.2.1 Prueba de continuidad

Esta prueba permite verificar que todos los raíles de alimentación que existen en la carga útil son independientes y no están cortocircuitados a tierra.

Para ello, será necesario emplear instrumentación electrónica como un multímetro u ohmímetro, de forma que se pueda medir el valor de impedancia de las diferentes conexiones.

El resultado será recogido en un informe donde se detalle si se han encontrado divergencias con los valores estimados durante la fase de diseño o no. En caso de encontrar algún valor fuera de especificaciones, será necesario indicar la acción correctora para solventarlo.

5.2.2 Prueba de aislamiento

Esta prueba está destinada a asegurar que no hay cortocircuitos entre pistas o componentes que no deberían estar conectados eléctricamente.

Este paso requiere usar instrumentación electrónica como un multímetro u ohmímetro, de forma que se pueda medir el valor de impedancia de las diferentes conexiones.

El resultado será recogido en un informe donde se detalle si se han encontrado divergencias con los valores estimados durante la fase de diseño o no. En caso de encontrar algún valor fuera de especificaciones, será necesario indicar la acción correctora para solventarlo.

Las pruebas funcionales son una parte crítica del proceso de validación de la carga útil implementada y se centran en verificar que cumple con sus requisitos funcionales y es capaz de ejecutar todas sus funciones previstas. Las siguientes subsecciones detallan el conjunto de pruebas que deben efectuarse para validar el sistema.

5.3.1 Prueba de alimentación

En este apartado, se procede a suministrar al sistema implementado el valor nominal de la tensión de alimentación para el que ha sido diseñado, monitorizando en todo momento el consumo de corriente de todo el conjunto para asegurar que se encuentra dentro de especificaciones. Además, se revisarán los diferentes puntos de prueba incluidos en la tarjeta implementada para asegurar que los niveles de tensión de estos se encuentran dentro de las especificaciones. En este punto, es necesario resaltar que las medidas de consumo de corriente de los diferentes subsistemas se harán siempre y cuando el sistema esté preparado para ello. En caso contrario, se deberán validar durante la fase de prestaciones.

Durante estas pruebas, la instrumentación electrónica necesaria se corresponderá con fuentes de

tensión programables, que permitan no sólo fijar de forma precisa la tensión de alimentación, sino que, además, habiliten la limitación de la corriente máxima que el equipo puede suministrar. Este aspecto es crítico para evitar daños irreparables en el sistema. También será necesario hacer uso de equipos de medida como multímetros y/u osciloscopios.

El resultado de la prueba debe ser un informe donde se detallan los niveles de tensión y corriente medidos.

5.3.2 Pruebas de señal

Están destinadas a validar que tanto las señales digitales como las analógicas de la carga útil implementada son correctas y se encuentran dentro de los valores para los que han sido diseñados. En el caso de las señales analógicas, se deberá evaluar que los niveles de tensión estén dentro de los valores previstos y que evolucionen como se espera. Por ejemplo, en el caso de un seguidor de tensión; la señal de salida de este bloque deberá reflejar las variaciones de la señal de entrada.

Para las señales digitales, será necesario asegurarse que tienen los niveles de tensión adecuados y sus valores lógicos son correctos.

Durante estas pruebas se deberá emplear aquella instrumentación electrónica que permita validar los puntos anteriores.

El resultado de cada prueba deberá recogerse en un documento, detallando de forma clara y concisa las posibles incidencias que se detecten.

5.3.3 Pruebas de comunicación

Estarán destinadas a validar la comunicación de cada uno de los subsistemas integrados en la carga útil con el microcontrolador incorporado, así como con sistemas externos como puede ser el ordenador de a bordo. Para ello, se deberá verificar que las interfaces de comunicación funcionan correctamente y permiten la transferencia de datos a la velocidad establecida en los requisitos del sistema.

Por tanto, el conjunto de pruebas que se realice debe estar destinado a comprobar que los datos se envían y reciben de forma correcta, asegurar que la velocidad de transmisión cumple con los requisitos establecidos y que los protocolos de comunicación definidos se cumplen.

Durante estas pruebas se deberá emplear aquella instrumentación electrónica y herramientas software que permitan validar los puntos anteriores.

El resultado de cada prueba deberá recogerse en un documento, detallando de forma clara y concisa las posibles incidencias que se detecten.

Este conjunto de pruebas está enfocado en determinar las prestaciones de cada uno de los subsistemas de la carga útil implementada. En ellas, se debe verificar aspectos como la ganancia de las etapas de adquisición, nivel de ruido, velocidad máxima de transferencia de datos, resolución temporal, etc. Además, será necesario evaluar el desempeño que presenta el sistema frente a diferentes condiciones de carga y modos de bajo consumo.

6 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha propuesto conseguir un sistema de monitorización capaz de detectar las vibraciones que se producen en una vía ferroviaria al pasar un tren con una precisión y resolución suficientes para su posterior procesamiento. El objetivo de este procesamiento es poder determinar el estado de dicha vía. Para lograr estos objetivos se ha realizado la selección de los sensores: esto ha sido necesario la búsqueda de un inclinómetro principal que se ha encontrado el Murata SCL3300-D01-10 y como acelerómetro el BMA400.

Además, se hizo una revisión de posibles algoritmos para determinar el estado de salud de una infraestructura crítica como son los raíles de una vía ferroviaria.

Tras esta primera fase de análisis, se creó de forma satisfactoria un esquemático en el programa Altium CircuitMaker y, una vez finalizada esta fase del diseño, se procedió a rutar la tarjeta impresa.

Por tanto, la realización del presente proyecto ha logrado cumplir todos los objetivos marcados a su comienzo.

Este proyecto da lugar a unas mejoras futuras de las cuáles las que más se han notado han sido el añadir un módulo de comunicaciones inalámbricas para el envío de datos a una plataforma remota que servirá como centro de control mediante un conector a red incluido en el sistema.

Además, se deberá desarrollar el firmware necesario para la adquisición de datos a tiempo real y los mecanismos de comunicación necesarios que permitan establecer la conexión con un equipo remoto que se encargue de procesarlos y mostrarlos en un centro de control.

Finalmente, una tercera línea de investigación que se puede explorar es el uso de recolectores de energía, *energy harvesters*, que permitan aprovechar la energía mecánica procedente de las vibraciones de la vía para la activación del dispositivo. Asimismo, se podría explorar la optimización del consumo de corriente del sistema para alargar su vida útil y aumentar el tiempo entre su cambio de baterías o recargas.

ANEXOS A. CREACIÓN DE COMPONENTES O EDICIÓN DE EXISTENTES EN CIRCUITMAKER

En caso de no encontrar un componente dentro de las librerías suministradas con el programa de diseño de tarjetas impresas, será necesario añadirlo manualmente. Para la creación de un componente en Circuitmaker, se accede a la pestaña Home, pulsando en el botón Part, Figura 28, y de allí hay dos opciones:

- Editar un componente existente
- Crear uno desde cero.

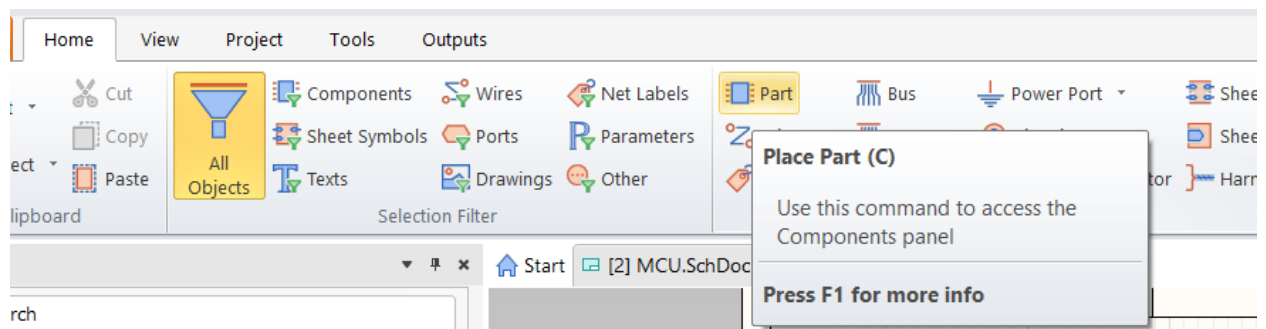


Figura 28. Barra de herramientas para la edición de componentes.

En las siguientes subsecciones, se detalla el proceso a seguir en cada opción.

La edición de un componente existente en las librerías disponibles, se pulsa con el botón derecho sobre el componente y se presiona editar. Este proceso es necesario realizarlo con aquellos componentes que no presenten algunas de las vistas necesarias (símbolo o huella) o su distribución dificulte la elaboración del esquemático.

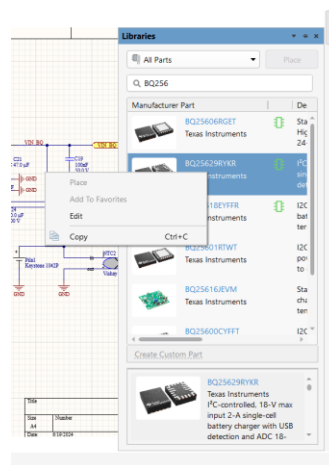


Figura 29. Menú para la edición de un componente.

La creación de un componente nuevo requiere pulsar en la opción de crear un nuevo componente, tal y como se muestra en la Figura 30.

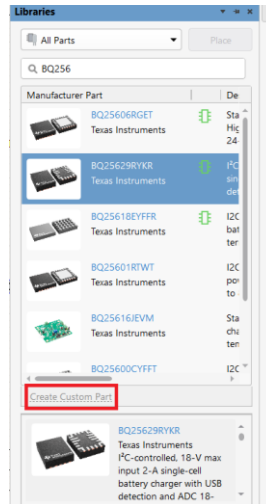


Figura 30. Crear una parte desde cero

Una vez en el menú, será necesario especificar el nombre del componente, una descripción de su funcionamiento y sus parámetros característicos, Figura 31.

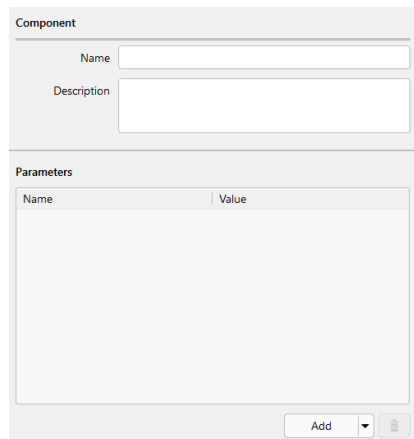


Figura 31 Descripción de un componente

Posteriormente, se crearán su símbolo y huella, pulsando en símbolo y huella, respectivamente. Estas opciones se muestran en la Figura 32.

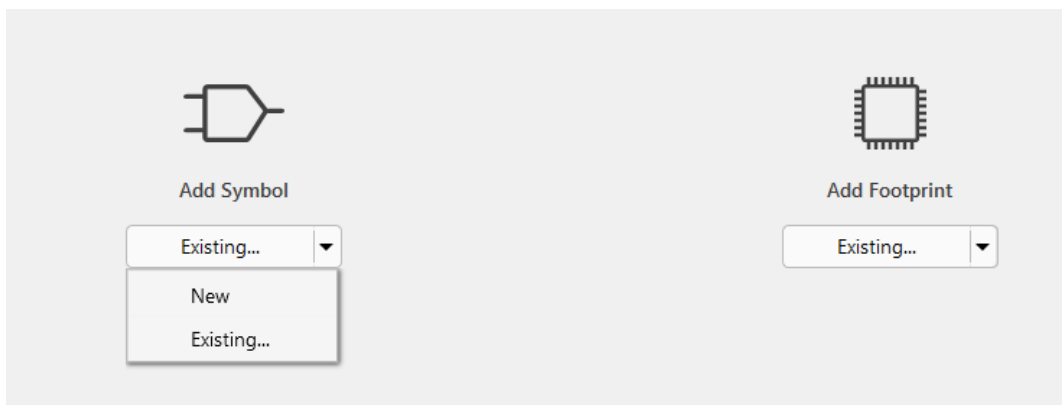


Figura 32. Botones de creación de símbolos y huellas.

En primer lugar, se creará el símbolo. Para ello, se emplearán las herramientas de la barra superior para añadir los terminales correspondientes, Figura 33. Para ello, será necesario asignarles el nombre indicado por el fabricante en la hoja de especificaciones y un identificador único. Este último campo se empleará para establecer la correspondencia entre el terminal y el pad que se inserte en la huella.

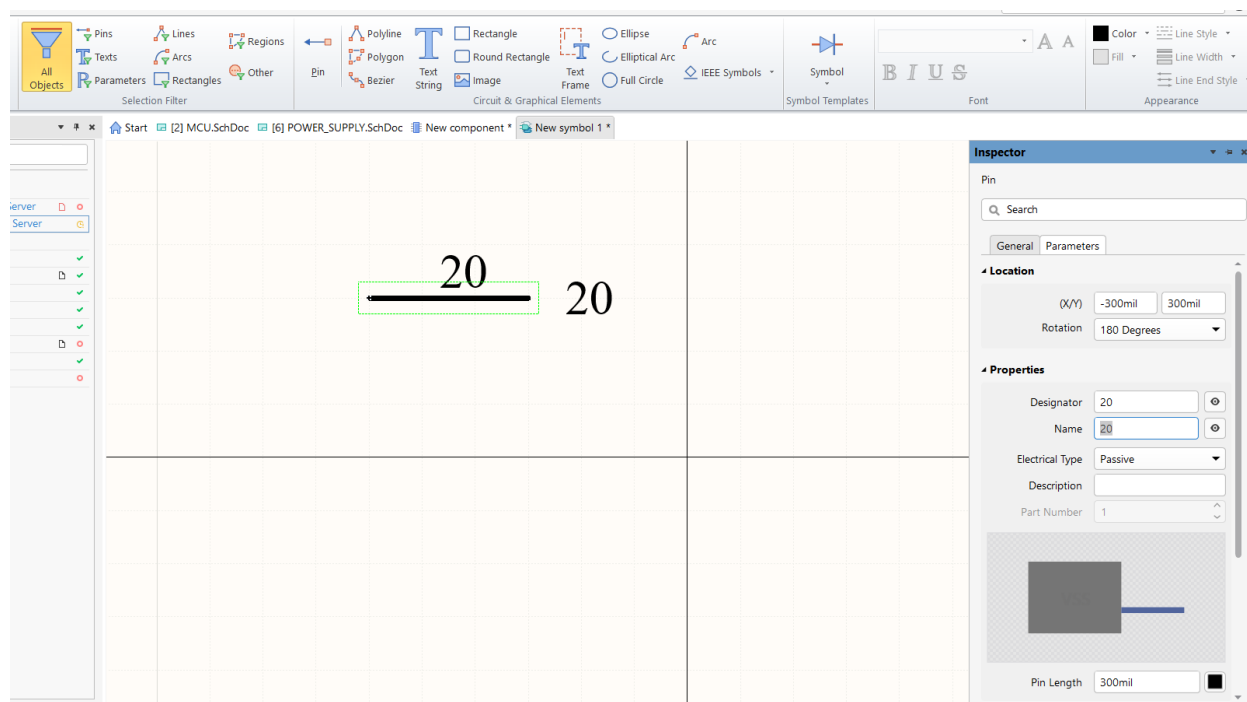


Figura 33. Creación de un símbolo.

Una vez finalizado el símbolo, se procederá a crear la huella dada por el fabricante. Para ello, se recomienda distribuir los pads a partir del centro. La ubicación de los pads debe cumplir la distancia asignada por el fabricante en la hoja de especificaciones. Además, será necesario añadir unas líneas que delimiten el espacio ocupado por el componente. Estas líneas deberán insertarse en la capa *SilkScreen*. La Figura. 34 muestra una captura de la ventana de creación de huellas que incorpora CircuitMaker.

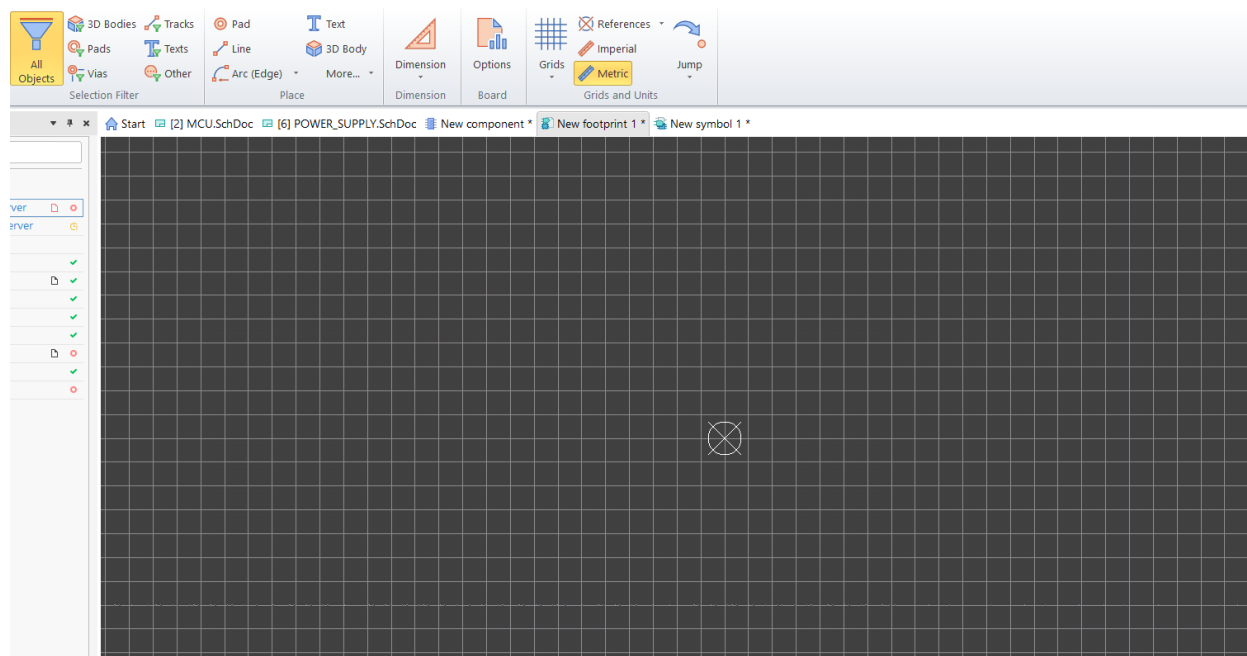


Figura. 34 Creación de una huella.

A continuación, la Figura 35 y Figura 36 muestra el símbolo y la huella de uno de los sensores incluidos en el sistema de adquisición diseñado y que no estaba disponible en las librerías de CircuitMaker.

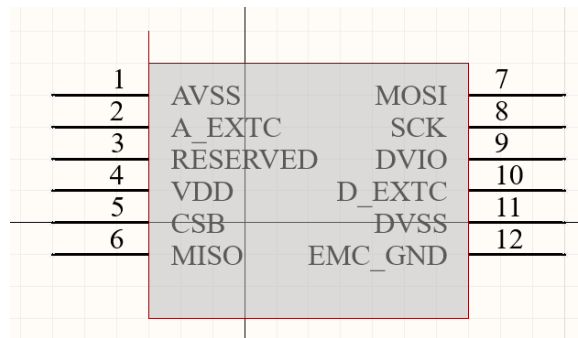


Figura 35. Símbolo del componente Murata SCL3300-D01-10.

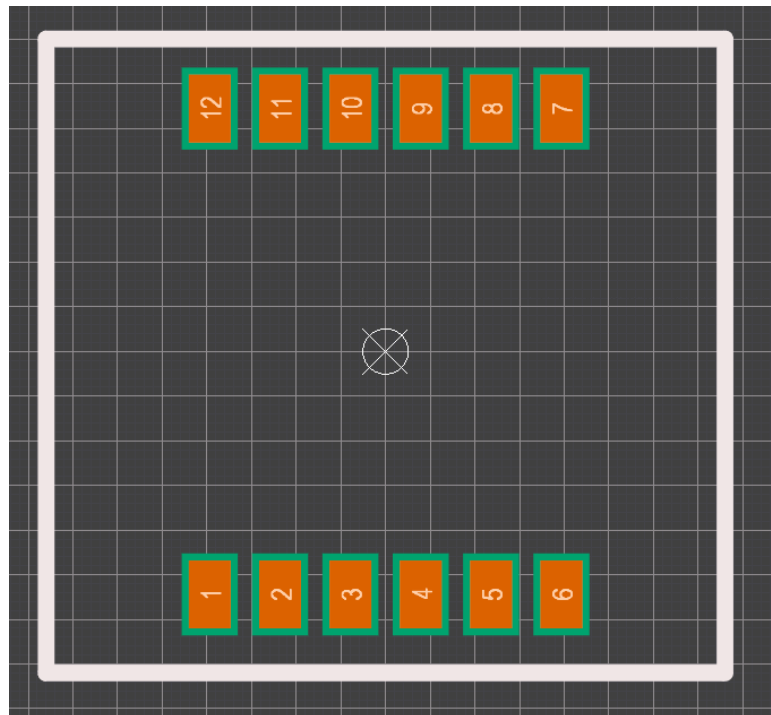


Figura 36 Huella del componente Murata SCL3300-D01-10

Este trabajo es vital debido a que me permitió usar tanto el símbolo como la huella en el programa a pesar de que no venía de allí.

Siguiendo el ejemplo anterior, se ha diseñado el componente BQ25629RYKR. la Figura 37 y usando para los pines la Tabla 17 para poder organizar los pines en sentido antihorario y usando de base un dibujo obtenido en la hoja de datos de [6].

Número	Descripción	Número	Descripción
1	BTST	10	STAT
2	REGN	11	INT
3	PMID_GD	12	SDA
4	D-	13	SCL
5	D+	14	CE
6	TS	15	GND
7	QON	16	SW
8	BAT	17	PMID
9	SYS	18	VBUS

Tabla 17. Tabla conexiones BQ25629RYKR.

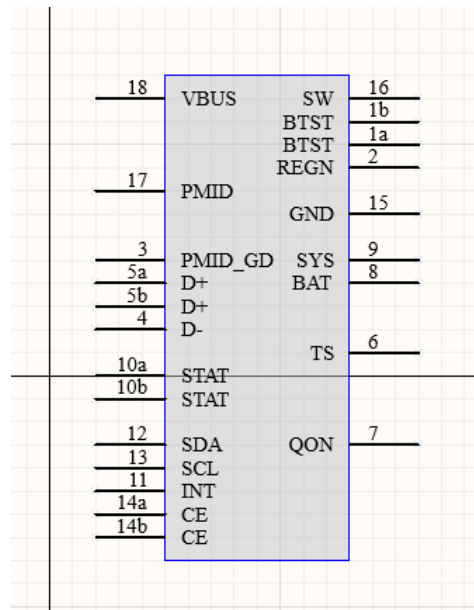


Figura 37. Símbolo del componente Texas Instruments BQ25629RYKR.

Este componente tiene una importancia relevante ya que, durante la edición de la huella, se detectó una limitación de la aplicación. Esta se corresponde con la imposibilidad de crear pads con formas arbitrarias. Por ello, hubo que utilizar 2 pads con identificadores independientes de forma rectangular. Este proceso permite utilizar la herramienta de rutado y las ayudas de diseño que incorpora. Sin embargo, este proceso dificulta el diseño, a la vez que puede introducir posibles errores y fallos en la fabricación de la tarjeta impresa, como puede ser incumplimiento de las reglas de diseño o cortocircuitos. El resultado se muestra en la Figura 38.

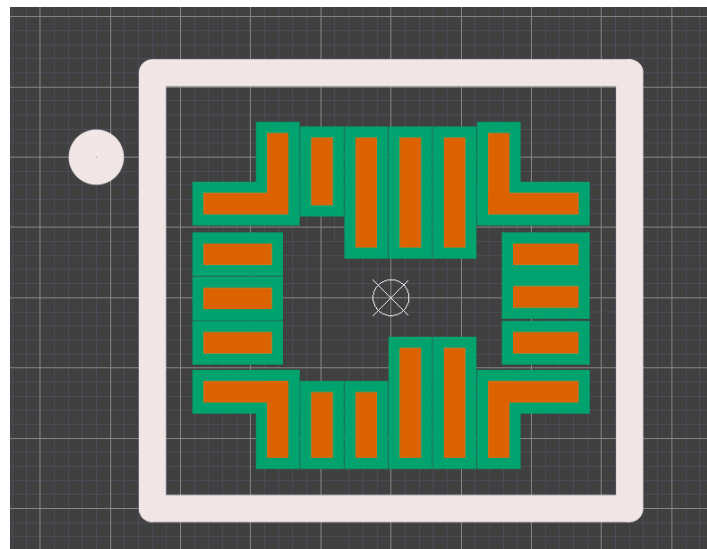


Figura 38 Footprint Texas Instruments BQ25629RYKR

Finalmente, el último componente creado fue el termistor Vishay NTCS0603E3103JHT. La Figura 39 y Figura 40 representan el símbolo y la huella de este componente, respectivamente.

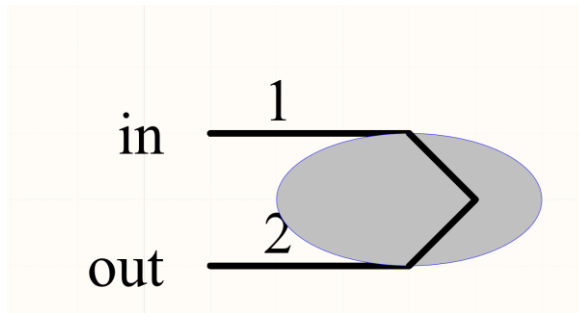


Figura 39. Símbolo del componente Vishay NTCS0603E3103JHT.

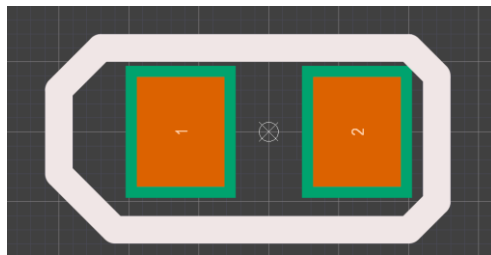


Figura 40. Huella del componente Vishay NTCS0603E3103JHT.

REFERENCIAS

- [1] Posital, “MEMS inclinometer from posital: How do they work?,” Posital, <https://www.posital.com/es/productos/inclinometros/mems/MEMS-Technology.php> (accessed Apr. 3, 2024).
- [2] Mxd6240au memsic | mouser. Available at: <https://www.mouser.com/ProductDetail/MEMSIC/MXD6240AU?qs=uBbGm2YIKJLo/6DYFcjhbw%3D%3D> (Accessed: 15 April 2024).
- [3] DataSheet - Mouser Electronics. Available at: https://www.mouser.com/datasheet/2/281/datasheet_scl3300-d01-1532018.pdf (Accessed: 15 April 2024).
- [4] DataSheet - Mouser Electronics. Available at: https://www.mouser.com/datasheet/2/281/datasheet_scl3300-d01-1532018.pdf (Accessed: 15 April 2024).
- [5] SCL3300-D01-10 Murata Electronics | mouser (no date) Mouser Murata Electronics SCL3300-D01-10 . Available at: <https://www.mouser.com/ProductDetail/Murata-Electronics/SCL3300-D01-10?qs=gZXFycFWdAOFydYBLsvu8Q%3D%3D> (Accessed: 19 April 2024).
- [6] BQ25629 (no date b) BQ25629 data sheet, product information and support | TI.com. Available at: https://www.ti.com/product/BQ25629?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=app-null-null-GPN_EN-cpc-pf-google-wwc_cons&utm_content=BQ25629&ds_k=BQ25629&DCM=yes&gclid=Cj0KCQjwrMKmBhCJARIsAHuEAPSyhgdbQDyP8I97eA1LhJzfDS1oRrKw1yaVy5wl6rOvgTE90NVPbNkaAqX8EALw_wcB&gclsrc=aw.ds (Accessed: 19 April 2024).
- [7] (No date) *STM32L432KCU6 stmicroelectronics* | mouser. Available at: <https://www.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/STM32L432KCU6?qs=dTJS0cRn7oiybcTRwI97Tw%3D%3D> (Accessed: 16 May 2024).
- [8] TC1185-3.3VCT713 (no date b) TC1185-3.3VCT713 data sheet, product information and support. Available at: https://www.mouser.es/ProductDetail/Microchip-Technology/TC1185-3.3VCT713?qs=L7mmR9vWTYjv9mdvONI4tQ%3D%3D&_gl=1*yzxs7t*_ga*MTY4MDI4OTQwNi4xNzAwMDY5MjAy*_ga_15W4STQT4T*MTcxNjY1MTIzNC4yNS4wLjE3MTY2NTEyMzQuNjAuMC4w.
- [9] “BMA400 Datasheet”, https://www.mouser.es/datasheet/2/783/BST_BMA400_DS000-1509606.pdf
- [10] Transfer Multisort Elektronik (2020) *¿Cómo funciona y qué hace el Acelerómetro?*, *Distribuidor de componentes electrónicos. Tienda en línea: Transfer Multisort Elektronik*. Available at: <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/22568/Como-funciona-y-que-hace-el-acelerometro/> (Accessed: 05 June 2024).