



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Trabajo Final de Grado

INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE TELECOMUNICACIONES

Facultad de Física

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO ‘HYDROPORE’

Barcelona, 19 de junio del 2022

Tutores: Javier Jose Sieiro Córdoba
(Electrónica) y Jordi Ortín (Física de la
Materia Condensada).

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades por hacer posible el proyecto, con referencia PID2019-106887GB-C32, del cual forma parte este trabajo.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Dr. Jordi Ortín, por depositar la confianza en mí para la realización de parte del proyecto.

En tercer lugar, quiero agradecer a la empresa ‘Premium PSU’ por el respaldo durante la realización del proyecto, así como también el permiso para el acceso a sus recursos.

En cuarto lugar y, por último, me gustaría hacer una mención especial a mi tutor del Departamento de Ingeniería Electrónica y Biomédica, Dr. Javier Sieiro, por la dedicación ya no sólo en este proyecto, sino también a lo largo del grado; estoy seguro de que su pasión y empeño formará a mejores ingenieros.

Resumen

Este Trabajo Final de Grado consiste en el diseño tanto a nivel de hardware como de software del sistema electrónico que controla el montaje experimental que lleva por nombre ‘HydroPore’. Dicho montaje experimental forma parte del proyecto: ‘Un nuevo enfoque para la escalada de flujo multifásico, deformación mecánica y transporte hidrodinámico en medios permeables: nuevos experimentos y análisis de datos’ dirigido por el Dr. Jordi Ortín y realizado en el Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Barcelona.

El documento comienza por la introducción a los problemas que debemos resolver y enlazaremos con las posibles soluciones a cada uno de ellos junto con la explicación de la opción escogida. Seguiremos con una explicación detallada de la solución y, una vez repasada, se analizará el DAFO del proyecto. A continuación, encontraremos la asignación de tiempo para cada una de las tareas dentro del trabajo y comentaremos el coste total del proyecto. Finalizaremos exponiendo los resultados obtenidos y con las conclusiones, en conjunto con un apartado de normativa y aspectos legales. Además, en los anexos, encontraremos información extendida de ciertos aspectos del proyecto, así como también: el software, la documentación y el proyecto PCB de integración del hardware en Altium.

Palabras clave

HydroPore, Montaje experimental, Interfaz de usuario, PCB, Lenguaje C, Lenguaje Python, Arduino, MSP430, Puente H, Actuador, LVDT, Celda ce carga, UART, I2C, SPI, OPAMP, ADC, LDO, EMC.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Marco del proyecto	6
1.2. Objetivos	7
2. INGENIERÍA DE CONCEPCIÓN	8
2.1. Capa física.....	9
2.1.1. Desplazamiento lineal de la estructura	9
2.1.2. Medida del desplazamiento de la estructura	10
2.1.3. Seguridad en el movimiento horizontal.....	11
2.1.4. Medida de la fuerza aplicada	12
2.1.5. Sensor de presión del agua	12
2.1.6. Cámaras	13
2.2. Capa electrónica.....	13
2.2.1. Movimiento del actuador.....	14
2.2.2. MCU	14
2.2.3. Acondicionamiento de las señales de los sensores	15
2.2.4. Alimentaciones	15
2.2.5. Comunicaciones con las cámaras	17
2.3. Capa de control	18
2.4. Capa de usuario.....	19
3. INGENIERÍA DE DETALLE.....	20
3.1. Puente en H.....	20
3.1.1. Transistores.....	20
3.1.2. Driving.....	21
3.1.3. Detección de sobre corriente del puente H	23
3.2. Acondicionamiento de las señales de los sensores.....	24
3.2.1. LVDTs	24
3.2.2. Sensor de presión del agua	25
3.2.3. Celdas de carga	25
3.2.4. Alimentación	26
3.3. MCU	27
3.3.1. Alimentación	27
3.3.2. Señales	27
3.4. Cámaras.....	29

3.4.1. Alimentación	29
3.4.2. Multiplexación de canales UART y driver RS232	29
3.5. Software	30
3.5.1. Microcontrolador	30
3.5.2. Arduino.....	32
3.5.3. Software de la capa de usuario	32
4. VIABILIDAD TÉCNICA	34
4.1. Debilidades	34
4.2. Amenazas.....	34
4.3. Fortalezas	34
4.4. Oportunidades	34
5. CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN	35
6. VIABILIDAD ECONÓMICA	35
7. RESULTADOS	36
8. CONCLUSIONES.....	40
9. NORMATIVA Y ASPECTOS LEGALES	40
10. BIBLIOGRAFÍA.....	41
11. ANEXOS.....	42
11.1. Transductores.....	42
11.1.1. LVDTs.....	42
11.1.2. Sensor de ultrasonidos	42
11.1.3. Celdas de carga.....	43
11.1.4. Sensor de presión del agua.	43
11.2. Puente en H	44
11.3. PCB	45
11.4. EMCs	49
11.5. Código C, Python y Arduino.....	51
11.6. Diagrama de flujo de la función principal del microcontrolador	51
11.7. Guía de usuario	51
11.8. Lista de material.....	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco del proyecto

Este Trabajo de Fin de Grado consiste en la realización completa del sistema electrónico que controla el montaje experimental ‘HydroPore’.

El montaje está formado por una estructura externa que servirá de apoyo a la estructura interna, lo vemos mejor en las Figuras 1 y 2. El interior está formado por una base en la que se coloca una roca y, justo encima, se monta una estructura con otra roca que encajará perfectamente con la primera. Sobre la segunda estructura se coloca un peso que aplicará una fuerza vertical constante. La base deberá moverse 10 mm horizontalmente rozando las dos rocas. El experimento empieza con el interior saturado de agua y conforme la base avance se realiza el estudio de:

- 1- El desplazamiento horizontal de la base.
- 2- El desplazamiento vertical de la estructura.
- 3- La evolución de la presión del agua a lo largo del experimento.
- 4- La cantidad de agua expulsada del sistema a través del movimiento.
- 5- La fuerza aplicada de manera vertical con el peso.
- 6- La fuerza aplicada horizontalmente a la base para moverla.

Para visualizar el sistema electrónico a desarrollar, presentamos las Figuras 1 y 2, anteriormente mencionadas, donde podemos apreciar cómo es el montaje experimental.

1. El ‘1’ señala la posición de dos transductores que deben medir el desplazamiento lineal de la estructura horizontal y verticalmente.
2. El ‘2’ marca dónde deben colocarse 2 transductores que midan la fuerza aplicada sobre la estructura, tanto horizontal como verticalmente.
3. El ‘3’ marca dónde se posicionará un sensor de presión del agua que registre la diferencia de presión conforme el experimento avance.
4. El objeto marcado con un σ_T define la posición en la que debe ir un actuador que mueva la parte inferior de la estructura.
5. En los 4 lados deberán posicionarse unas cámaras que monitoricen la cantidad de agua expulsada por cada lado, en la Figura 3 vemos aproximadamente cómo deberán colocarse.
6. La ‘Q’ marca dónde deberá colocarse el sensor de presión del agua.

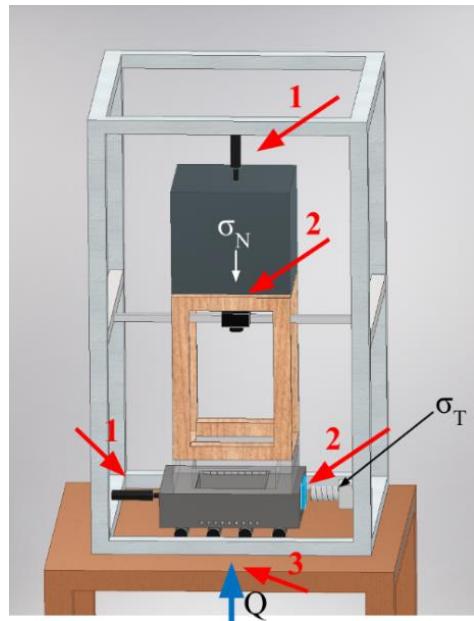


Figura 1. Proyección 3D del montaje experimental.

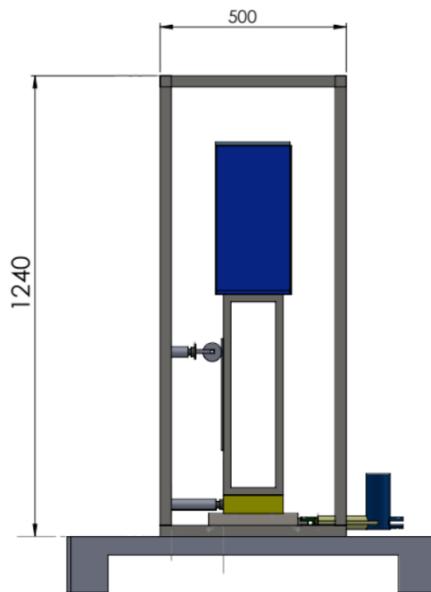


Figura 2. Vista lateral del montaje experimental.

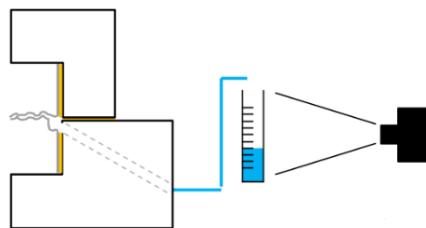


Figura 3. Aproximación de la posición de las cámaras para monitorizar el nivel de agua expulsado.

El sistema por desarrollar gestionará la actuación del motor, la recogida de datos de los transductores, su tratamiento, su procesado y el envío hacia una herramienta externa que pueda almacenarlos para su posterior estudio.

1.2. Objetivos

El principal objetivo del Trabajo de Fin de Grado es el desarrollo del sistema electrónico que controla el montaje experimental ‘HydroPore’.

Al ser un proyecto compuesto de muchas partes, lo dividiremos en subobjetivos.

1. Estudio del problema y propuesta de una solución al investigador principal del proyecto.
2. Realizar el diseño del PCB al que se conectarán todos los transductores.
3. Realizar el software que controla la electrónica diseñada en el subobjetivo número 2.
4. Realizar una interfaz accesible para cualquier usuario que quiera usar el sistema.

2. INGENIERÍA DE CONCEPCIÓN

En este apartado, estudiaremos las soluciones elegidas para implementar cada una de las partes del proyecto.

En el inicio, no todos los parámetros y requisitos de la plataforma ‘HydroPore’ en cuanto a funcionamiento, estaban definidos; por consiguiente, se podían producir variaciones de ciertos aspectos conforme se avanzaba en el desarrollo del proyecto. Una manera de poder manejar este hecho es hacer un diseño conceptual por capas. En nuestro caso se han establecido 4, tal como muestra la Figura 4.

1. Capa física: compuesta por todos aquellos transductores que forman el sistema.
2. Capa de electrónica: formada por el circuito que maneja la capa física.
3. Capa control: se incluye el software que maneja la capa de electrónica.
4. Capa de usuario: formada por los métodos que tiene el usuario de interactuar con el sistema.

La capa física y la electrónica son tangibles, la de control y la de usuario son lógicas.

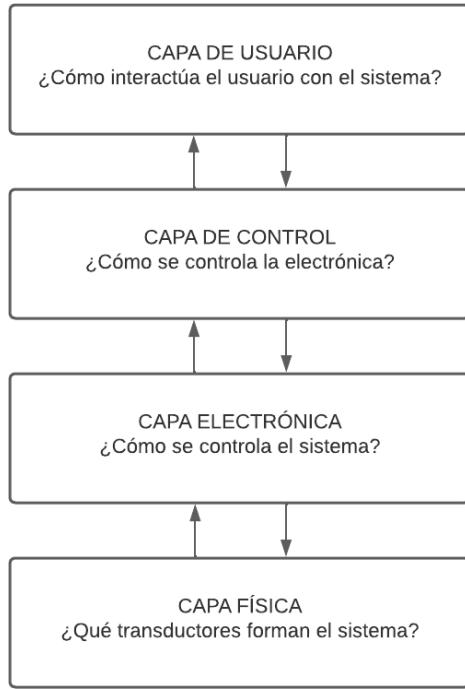


Figura 4. Estructura de capas del proyecto.

Este diseño por capas nos permite tener una visión más global del sistema. Así, si se modifica un requisito del proyecto, es más fácil planificar qué partes del sistema deben modificarse.

2.1. Capa física

En este subapartado explicaremos las distintas opciones que tenemos para cada transductor y el porqué de la solución elegida. Para cada parte del sistema, estamos interesados en los siguientes aspectos físicos:

1. Desplazamiento lineal de la estructura: ¿cómo movemos la base inferior?
2. Medida del desplazamiento de la estructura: ¿cómo medimos el desplazamiento vertical y horizontal de la estructura?
3. Seguridad en el movimiento horizontal: ¿cómo protegemos el sistema ante un movimiento mayor del permitido?
4. Medida de la fuerza aplicada: ¿cómo sabemos la fuerza aplicada horizontal y verticalmente?
5. Sensor de presión del agua: ¿cómo medimos la diferencia de presión entre medidas?
6. Cámaras: ¿Cómo registramos la cantidad de agua expulsada?

En el anexo 11.1. encontraremos más información de los transductores, sobre todo en cuanto a su funcionamiento.

2.1.1. Desplazamiento lineal de la estructura

El primer problema que abordamos dentro del proyecto es la forma de mover la estructura. Necesitamos un transductor que tenga un recorrido lineal, con precisión y capaz de mover de manera lateral cerca de 30 kg con apenas rozamiento (debajo de la base se montan unas ruedas que hacen que el contacto entre la base y el suelo sea despreciable). Barajamos diferentes opciones como motores rotativos DC o paso a paso. Montar estos tipos de motores implican más trabajo mecánico, pues se debería construir una estructura que traduzca el movimiento del motor rotativo en empuje lineal a la estructura. El principio de transmisión es el mismo que en un motor de un escáner: un motor paso a paso acoplado a unos engranajes que mueven una correa dentada, esa correa se une a la estructura que se quiere mover. En la Figura 5 podemos ver un ejemplo.

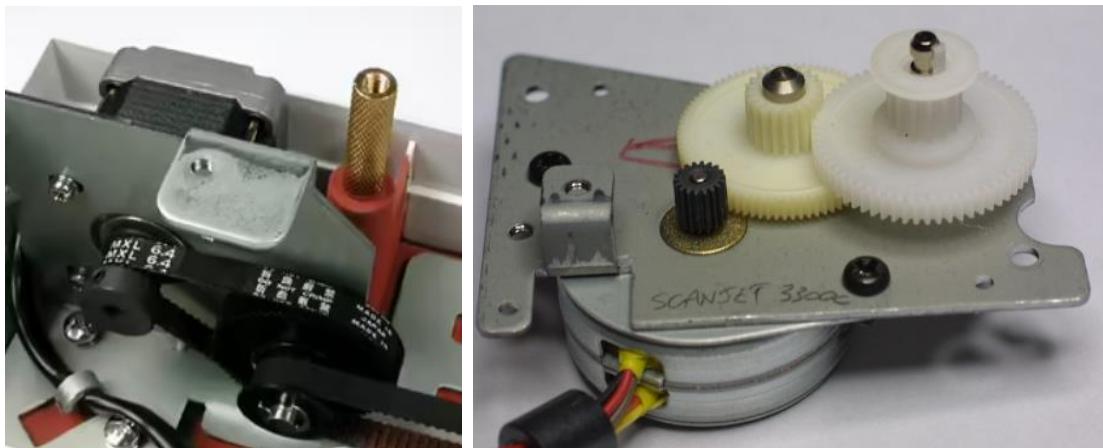


Figura 5. Montaje mecánico de un motor de escáner [1].

Para evitar realizar un trabajo mecánico extra y teniendo en cuenta que los motores de escáner no mueven demasiado peso, descartamos esa opción. La alternativa que sigue el principio comentado son los actuadores lineales. Su funcionamiento es muy parecido a un motor DC: polarizando con tensión positiva, el brazo se extiende; polarizando de manera inversa, el brazo se contrae. Una forma sencilla de controlarlo es a través de un puente H. El modelo ha sido escogido según necesidad de prestaciones y facilidades de adquisición por el proveedor. Podemos ver cómo es físicamente en la Figura 6.

Se ha elegido un actuador que nos proporciona un ‘feedback’ de la posición de su vástago mediante un divisor de tensión, en el cual hay situado un potenciómetro que varía su valor según la distancia recorrida. Desconocemos la resolución de este ‘feedback’, pero podemos suponer que es del orden del mm; que está muy lejos de la necesaria, pero sí nos ayudará a tener una segunda medida del recorrido del vástago. Existe una desventaja: no posee límites de extensión. Nuestro rango de movimiento es de, como máximo, 10 mm, lo que implica que no deberemos recorrer en su totalidad la extensión del actuador, que es de 50 mm. Aun así, se controla su posición a través de varios caminos, como veremos.



Figura 6. Actuador lineal escogido para el proyecto.[2]

2.1.2. Medida del desplazamiento de la estructura

El siguiente problema que abordamos es el monitoreo de la posición de la estructura. Como hemos comentado, el propio actuador nos proporciona un ‘feedback’ de su posición mediante un divisor resistivo en el que se incluye un potenciómetro que varía su valor según la extensión del brazo. El fabricante no nos proporciona información de sus características; por tanto, no podemos confiar a priori en éste para determinar la posición de la estructura. Este sistema debe tener una precisión en el rango de los 10^{-4} mm, necesitamos de más transductores para cubrir las especificaciones.

Otra opción que se ha valorado ha sido un método de triangulación por láser, el cual mejora la precisión; por contra, el entorno que se encontrará el sistema no es adecuado para dicha técnica, puede debe ser poco luminoso. Se basa en un láser que apunta al objeto y un receptor que recoge la luz reflejada por el mismo, sabiendo la velocidad de la luz en el aire, podemos saber la distancia al objeto.

Existen unos transductores llamados LVDTs (‘Lineal Variable Differential Transformer’), los cuáles miden desplazamientos lineales con una precisión inigualable, algunos modelos llegan al orden de los micrómetros (más información en el anexo 11.1.1). Además, podemos usar dos de ellos para los dos desplazamientos de la estructura que necesitábamos medir, tanto el horizontal como el vertical. Dentro de la gran familia de LVDTs existen los que se alimentan con DC y AC. Los de AC son más versátiles pues no contienen electrónica interna, lo que también los hace ideales si buscamos una vida útil larga. En nuestro caso, priorizamos la simplicidad en diseño de PCB sin perder prestaciones. Una alimentación AC, implicaría añadir un oscilador al circuito, el cual no es un circuito trivial. Un tipo de salida que podemos encontrar es en corriente, de 4 mA a 20 mA dependiendo de la extensión del núcleo. Para poder acondicionar dicha señal y que sea leída por un ADC deberíamos usar una resistencia de SHUNT para pasarla a tensión o incluso un amplificador de trans-impedancia, para luego amplificarla; opciones que harían crecer innecesariamente nuestro circuito. Los sensores con ese tipo de salida están pensados para el sector industrial, conectados a PLCs, ya preparados para las condiciones ambientales. Hemos optado por una salida en tensión, de 0 a 5 V. No ha sido tarea fácil elegir un modelo adecuado para nuestra aplicación, pues existe una oferta amplia pero no variada. Encontramos un modelo de ‘Solartron’, un fabricante experimentado y fiable, pero el distribuidor sólo ofrecía el modelo con núcleo guiado, el cual no es adecuado para lo que necesitamos. Finalmente hemos optado por un modelo de ‘TE Connectivity’ [3]. Su recorrido máximo es de 12.5 mm y con alimentación DC de 15 V (característica que ha sido determinante, además de la facilidad de adquisición a través del distribuidor). En la Figura 7 se presenta una imagen del LVDT escogido.

**Figura 7.** LVDT de TE Connectivity.

2.1.3. Seguridad en el movimiento horizontal.

La longitud del vástago del actuador nos permite un margen de 50 mm para poder movernos y teniendo en cuenta que no tiene un final de carrera, necesitamos un elemento de seguridad que impida exceder los límites del rango de movimiento. Es decir, precisamos de otro elemento, a parte del LVDT y el ‘feedback’ del actuador, que frene el avance del actuador para evitar el desplazamiento de la roca fuera de su rango.

Cualquier solución que implicaría medidas mediante el rebote de la luz quedaba descartada, por lo comentado en el apartado anterior, el entorno no será el adecuado. Podríamos añadir un final de carrera mecánico, pero es una solución que podría llevar a quemar el motor del actuador.

Un sensor de ultrasonidos nos proporciona una medida no demasiado precisa, el rango dinámico es desde los 2 cm hasta los 4 m con una precisión de 2 cm, pero más que suficiente para poder usarlo como final de carrera. Este sensor no se usa para saber la distancia hasta el objeto, sino simplemente para saber si hay un objeto delante.

El principio de funcionamiento es el mismo que la triangulación del láser, pero a través de una onda ultrasónica (más información en el anexo 11.1.2). No invertimos mucho tiempo en la valoración de opciones en el mercado, pues ya se conocíamos un modelo el cual era perfectamente válido ya que tanto el rango de medida como las prestaciones necesarias encajaban con el diseño. El modelo es el HC-SR04; en la Figura 8 podemos ver cómo es físicamente el transductor.

En cuanto a la posición vertical de la estructura, no tendremos demasiados problemas pues tiene un recorrido máximo limitado por la propia mecánica.

**Figura 8.** Sensor de ultrasonidos HC-SR04 [4]

2.1.4. Medida de la fuerza aplicada

El sistema requiere de dos transductores que midan la fuerza que se aplica sobre la estructura: de manera horizontal, mediante el actuador lineal; y sobre la muestra, de manera vertical, con el peso muerto. En este caso, estos sensores venían definidos por los responsables del proyecto: celdas de carga (explicación de funcionamiento en el anexo 11.1.3.).

Se ha elegido el modelo S2M de HBM de 200 N para nuestras medidas. Las necesidades exigen medir hasta 150 N con una resolución de aproximadamente 1 N. Si los requerimientos no hubieran sido tan específicos podríamos haber escogido un modelo comercial, lo que también reduciría el coste. El modelo elegido dispone de 7 señales eléctricas: salida positiva, salida negativa, alimentación negativa, alimentación positiva, referencia positiva, referencia negativa y EARTH para la carcasa.

La Figura 9 muestra la celda elegida, la cual puede medir hasta 200 N con una resolución del 0.02 %, es decir, aproximadamente 0.04 N.



Figura 9. Celda de carga de HBM [5].

2.1.5. Sensor de presión del agua

En este caso, no nos hemos preocupado por las opciones posibles para medir la presión del agua, porque existe un transductor específicamente para ello. El sensor escogido tiene una resolución de 0.25% FS, es decir, 0.025 bares, pues su fondo de escala son 10 bares. Esta medida mínima equivale a, aproximadamente, 25 cm de columna de agua. Se aleja 10 cm de las especificaciones, que eran de 15 cm, pero el coste de este sensor con respecto a los que cumplían las especificaciones era muy inferior; hemos sacrificado resolución en pro del coste.

Hemos optado por un sensor resistivo de RS que vemos en la Figura 10, basado en un puente de Wheatstone (más información en el anexo 11.1.4), con una salida en tensión de 0-5 V dependiendo de la presión del agua. Este tipo de salida nos simplifica la electrónica de acondicionamiento de la señal. Valoramos un modelo de IDM, un fabricante nacional de sensores, pero la comparación de las prestaciones con el precio y la dificultad burocrática para acceder a sus productos decantó la elección.



Figura 10. Sensor de presión de RS [6].

2.1.6. Cámaras

Con el fin de registrar el nivel de agua expulsado por cada uno de los 4 lados de la estructura, precisamos de cámaras que capturen ciertos momentos relevantes. Con el objetivo de reducir costes, hemos optado por un modelo que tuviese comunicación serie. Además, otra característica importante es que consumo de potencia sea reducido, pues se alimentan a través del PCB. Su consumo es de aproximadamente 0.5W. En la Figura 11 se puede apreciar el aspecto que tienen.



Figura 11. Cámara con comunicación serial [7].

Como podemos ver, es una opción muy compacta, que nos ofrece tanto versatilidad como sencillez en su uso. Ofrece un tamaño de imagen de 640x480 pixeles, suficiente para poder apreciar la diferencia del nivel del agua en los vasos.

Se ha descartado el uso de cámaras que tengan su propio software pues puede llevar problemas no sólo de implementación, sino de licencias.

2.2. Capa electrónica

En este subapartado encontraremos la explicación de las soluciones elegidas para cada una de las partes necesarias en el PCB.

Para entender las necesidades de esta capa, presentamos el diagrama de bloques de la Figura 12, en la que el bloque central es la PCB con los distintivos módulos y los bloques externos son los transductores. En la PCB tenemos:

1. Puente H para mover el actuador.
2. El MCU, al cual deben ir conectados todos los módulos.
3. Los conectores de las señales de los sensores y sus circuitos de acondicionamiento.
4. Alimentaciones del sistema.
5. La comunicación con las cámaras.
6. Las comunicaciones con dispositivos externos mediante I2C y UART.

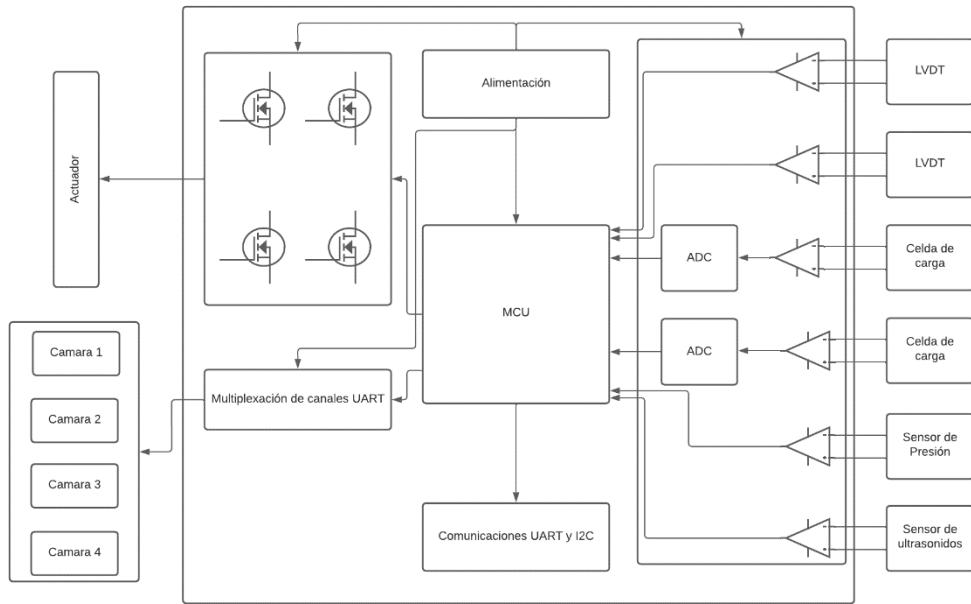


Figura 12. Diagrama de bloques: PCB en el centro y transductores en el exterior.

2.2.1. Movimiento del actuador

Tal y como hemos comentado anteriormente, el actuador se basa en el funcionamiento de un motor DC, por tanto, podemos usar un puente H para moverlo, que además nos permite regular la tensión mediante el control del ciclo de trabajo con una señal PWM y reducir o aumentar la velocidad del actuador. El puente lo forman 4 transistores de potencia y un detector de sobre corriente basado en una resistencia de SHUNT. Este detector estará sensando continuamente la corriente que atraviesa el puente para evitar que el motor tenga un consumo excesivo o pueda darse un cortocircuito en los transistores de medio puente.

2.2.2. MCU

Una vez sabemos qué recursos necesitamos para controlar el sistema, el componente más crítico y en el que debemos pensar primero es el microcontrolador. No necesitamos un controlador con muchas prestaciones, pero sí unas básicas:

1. Un mínimo de 3 canales de UART: para poder comunicarnos con las 4 cámaras y un ordenador.
2. Un mínimo de 4 canales de ADC de 12 bits y una frecuencia de muestreo del orden de 100 kHz: para poder traducir las señales proporcionadas por los sensores.
3. Un mínimo de 2 salidas de temporizadores tipo PWM: para poder controlar el ciclo de trabajo del puente H.
4. Un mínimo de 1 canal SPI: para poder comunicarnos con los ADCs externos de las celdas.

Prestaciones como la velocidad de reloj no es tan crítica pues el sistema no debe ser necesariamente rápido. Valoramos la familia STM32 de ST, pero las exigencias de desarrollo no permiten esa opción, pues requiere de cierta curva de aprendizaje que no podemos realizar. Optamos por un microcontrolador de la familia del MSP430 de Texas Instruments (TI). Es una magnífica opción pues era un microcontrolador conocido por haber trabajado con él durante los años del grado y cumplía todos los requerimientos del sistema.

2.2.3. Acondicionamiento de las señales de los sensores

El circuito de acondicionamiento de señales de sensores debe basarse en amplificadores operacionales, para que el transductor trabaje con una impedancia de carga alta.

A parte de lo comentado, un problema en nuestro sistema es que las señales que deberemos tratar pueden ser de 5 V, mientras que los pines del microcontrolador MSP430 son 3.3 V tolerantes. Esto implica que no sólo deberemos tratar la señal, sino también atenuarla.

Sabiendo esto, nuestros circuitos de acondicionamiento se basan en amplificadores diferenciales [8] y de instrumentación. Para este último, además de proporcionar una impedancia alta en la entrada, elimina el modo común de la medida proporcionando una ganancia muy alta que. Como veremos, son características necesarias para poder adaptar la señal proveniente de las celdas de carga. Además, para las celdas, optaremos por usar ADC externos, para poder aprovechar la referencia que nos proporcionan y tener una medida más exacta.

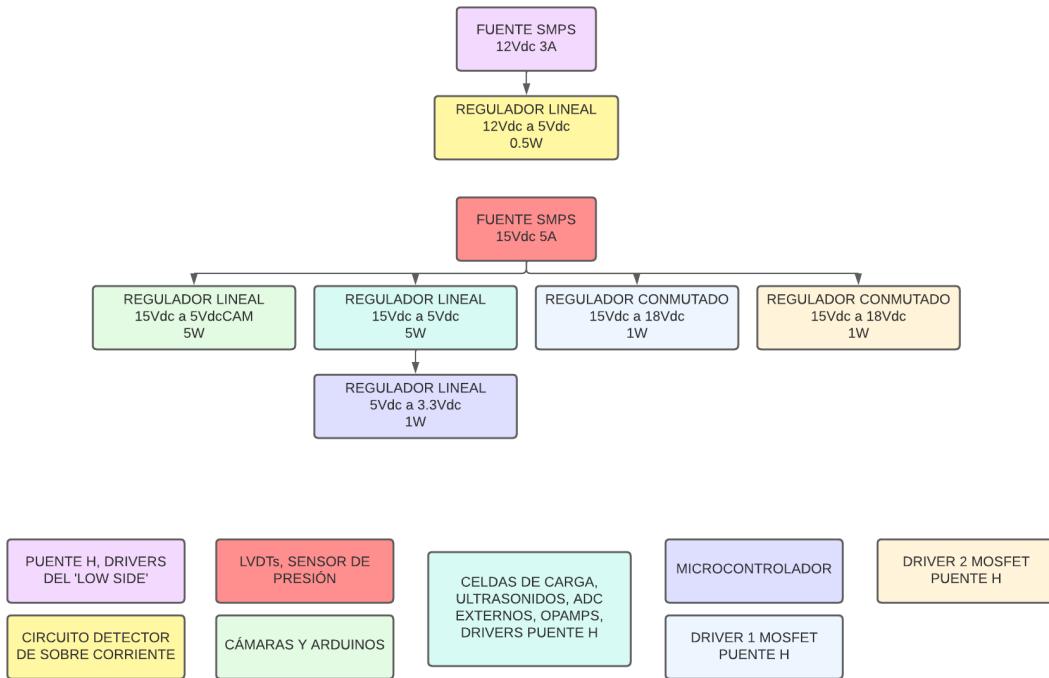
2.2.4. Alimentaciones

Usamos dos fuentes independientes para alimentar nuestro sistema; una para la parte del puente en H y la otra para la parte del control; así lo hemos decidido para poder separar la masa de la parte de sensores y MCU, de la parte donde ocurren las commutaciones. Hemos optado por usar fuentes SMPS, es decir, ‘Switched Mode Power Supplies’, o fuentes conmutadas.

Las fuentes conmutadas con respecto a las lineales nos ofrecen una serie de ventajas:

1. Eficiencia: en las fuentes SMPS las pérdidas se reducen notablemente, pasamos de un rango de entre el 30% y el 60% a un rango de entre 70% y 90%. A las pérdidas en los lineales se las llama ‘headroom loss’ y son debidas al transistor de paso. Son inevitables para poder polarizar la etapa de potencia y cumplir con las especificaciones de regulación de línea.
2. Tamaño y coste: al trabajar a unas frecuencias mucho más altas, el transformador puede ser más pequeño.

La Figura 13 nos muestra un esquema de cómo se reparten las alimentaciones, así como también los requisitos mínimos de cada uno de los módulos en cuanto a consumo.

**Figura 13.** Esquema de las alimentaciones del PCB.

Hemos optado por una fuente de 36W (12V y 3A) para alimentar la parte del actuador. Hemos usado una de 75W (15V y 5A) para alimentar a los sensores y el control. Se ha decidido sobredimensionar las fuentes para dejar un buen margen y poder incorporar posibles futuras necesidades (sensores de más consumo, por ejemplo). En la Figura 14 vemos un ejemplo de una fuente SMPS usada en el proyecto.

**Figura 14.** Fuente SMPS de RS.

Las dos fuentes SMPS nos proporcionan las alimentaciones principales, pero requerimos de más tensiones tal como muestra el esquema de la Figura 13.

Para poder conseguir la mayoría de ellas hemos optado por usar LDOs o reguladores lineales. La eficiencia de estos es mucho menor que las conmutadas, como hemos visto, pero priorizamos la simplicidad del diseño y el tamaño en este caso (en la Tabla 1 se recogen las ventajas e inconvenientes entre LDOs y SMPS).

	DC/DC converters (switching regulators)	LDO regulators (linear regulators)
Efficiency	High	Low
Price	High	Low
Noise	Loud	Low
Design	Difficult	Easy
Components	Many	Few
Load Current	Large	Small

Tabla 1. Comparativa de prestaciones entre los convertidores DCDC y los LDO.

Usamos dos convertidores DC/DC para conseguir la tensión requerida por las puertas de los MOSFET del ‘high-side’. Hemos escogido esta opción pues necesitamos que sea una fuente de tensión aislada (por tener distintas referencias) y, además, que la tensión de salida sea mayor a la entrada; rasgos característicos que los LDO no cumplen en ningún caso. Podríamos haber optado por diseñar nuestro propio convertidor boost, pero se ha descartado porque la circuitería se complicaría y el espacio necesario en la PCB sería mayor.

2.2.5. Comunicaciones con las cámaras

Como hemos comentado anteriormente, el MCU precisa de un mínimo de 3 canales UART para la comunicación con el PC y las cámaras. Tenemos un total de 4 cámaras, en un principio 2 canales parecen insuficientes.

Pocos microcontroladores en el mercado ofrecen la posibilidad de 5 canales UART, por tanto, necesitamos una solución poder usar un microcontrolador de 3 canales (que es la cantidad usual).

En el esquema de la Figura 12 vemos un módulo llamado ‘multiplexación de canales UART’, el cual está destinado a aprovechar los dos canales para ‘convertirlos’ en 4.

Durante la etapa de diseño se ha realizado un estudio del tiempo necesario para poder tomar una fotografía y recibirla (aproximadamente un minuto por imagen). Los resultados nos han hecho añadir una opción en el PCB que nos permite no usar los canales UART y usar Arduinos externos para el control de las cámaras, siempre gobernados por el microcontrolador.

2.2.6. Comunicaciones con dispositivos externos mediante I2C y UART

Una sección de la placa está reservada para las comunicaciones con el exterior, es decir, con otros dispositivos externos al sistema. El puerto UART es para recibir y enviar datos con un ordenador. El puerto I2C se añade como un extra, es decir, en la solución no se contempla un dispositivo I2C tal como una pantalla LCD, pero se da la posibilidad para que en un futuro pueda incorporarse.

2.3. Capa de control

En este subapartado encontraremos la solución en cuanto al software, es decir, cómo monitorizamos la capa electrónica.

Del microcontrolador usamos los siguientes recursos (lo vemos mejor en el esquema de la Figura 15):

1. Puertos digitales para los LEDs de estado, para las señales de activación de los transistores bajos del puente H y para la lectura del circuito de sobre corriente del puente H.
2. El ADC para poder convertir la señal analógica, que nos devuelven los LVDTs y el transductor de presión, a digital para poder ser enviada al PC a través de UART.
3. Comunicación SPI para poder recoger los datos que nos envían los ADCs externos, conectados a las celdas de carga.
4. Módulo UART para la comunicación con el ordenador; recibiremos comandos y enviaremos las medidas de los sensores.
5. Los ‘timers’ tienen varios objetivos: uno para tener controlado el ‘time out’ de las comunicaciones, otro para generar las señales PWM de los transistores altos del puente H y uno más en modo captura para poder usar el sensor de ultrasonidos.

En cuanto al software de los Arduino que controlan las cámaras, podemos destacar que usamos:

1. Dos puertos digitales, uno para saber cuándo tenemos que tomar una fotografía y otro para indicar que se ha capturado una imagen,
2. Dos módulos de comunicaciones: SPI para grabar las imágenes en la tarjeta SD y UART para poder comunicarnos con las cámaras.

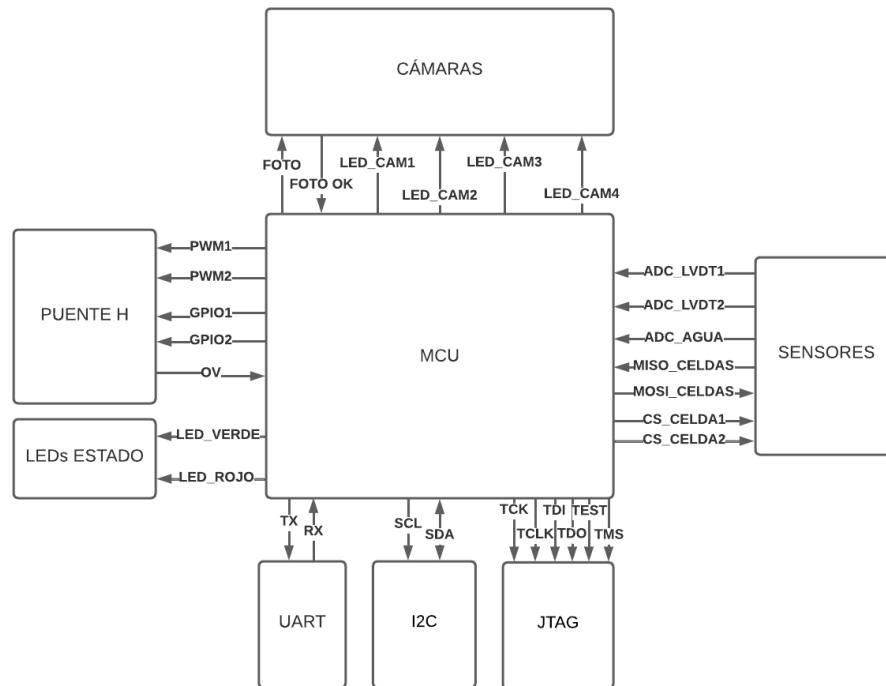


Figura 15. Diagrama de bloques del PCB con las señales de cada módulo.

2.4. Capa de usuario

En este subapartado encontramos la solución propuesta para la interacción entre el usuario y el sistema.

Las especificaciones del proyecto requieren que el sistema se controle de manera sencilla, sin tener que acceder al código. Por este motivo, se ha optado por desarrollar una interfaz que permita al usuario enviar comandos al microcontrolador, siendo esta comunicación transparente para quién lo maneja. El control se hace a través de una aplicación que restringe los comandos que se pueden enviar a los estrictamente pautados.

Al usar un microcontrolador de la familia del MSP430, no tenemos soporte para protocolos como por ejemplo USB, sólo podemos hacerlo a través del UART, el cuál es un método eficiente para poder enviar y recibir la cantidad de datos que manejamos. Conectamos el ordenador y el controlador a través de un FTDI, es decir, todo a través de cables, puede no ser la manera más cómoda pero sí las más fiable.

La interfaz enviará comandos dependiendo del programa que se quiera ejecutar y recogerá los datos de los sensores para guardarlos en un archivo de texto.

3. INGENIERÍA DE DETALLE

En este apartado se expone con detalle el desarrollo de las capas electrónica, de control y usuario.

Para la capa electrónica, encontraremos la explicación del circuito de cada módulo del PCB.

Para la capa de control, encontraremos la explicación del código del microcontrolador, así como también el de los Arduino.

Para la capa de usuario, veremos el diseño de la interfaz y la explicación del funcionamiento de esta.

3.1. Puente en H

Un puente H o en H es un circuito electrónico que generalmente se usa para permitir a un motor DC girar en ambos sentidos. Suele estar compuesto por 4 transistores colocados en forma de H, tal y como muestra la Figura 16.

Esta topología funciona de la siguiente manera: cerraremos los transistores en diagonal, es decir, según la Figura 16, o bien A con D o bien C con B, siempre consiguiendo que la corriente circule a través de la carga. Este diseño nos ofrece otras posibilidades, como por ejemplo parar en seco el motor, si abrimos A y C, cerrando B y D. Podemos hacer diferentes combinaciones siempre y cuando no se cierren al mismo tiempo los transistores de la misma rama, pues causaría un corto circuito.

Es importante recordar que la parte del puente en H posee una referencia distinta a todo el resto del circuito; las commutaciones se producen en este módulo, debemos separarlo lo mejor posible de las señales críticas como pueden ser las comunicaciones o las señales que llegan al ADC.

3.1.1. Transistores

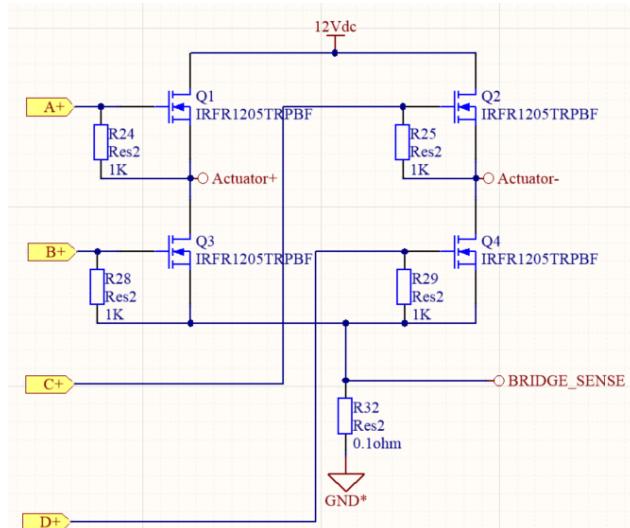


Figura 16. Puente en H.

Se ha escogido diseñar el puente H con MOSFETs de canal N y no P principalmente por el valor de la $R_{ds(on)}$. En los transistores P suele ser mayor, lo que se traduce en una mayor disipación de potencia en el MOSFET, subiendo la temperatura de este.

Como se aprecia en la Figura 16, se ha incluido una resistencia entre la puerta y la fuente de los transistores; esto es debido a que queremos tener siempre un valor conocido en la puerta, ya que, si está al aire, el valor de tensión es indeterminado, lo que podría ocasionar un disparo involuntario del MOSFET.

La señal ‘Bridge Sense’ la usamos para monitorizar la corriente que atraviesa el puente, lo veremos en profundidad en el apartado 3.1.3.

3.1.2. Driving

Hemos optado por drivers individuales y no dobles por simplicidad en el diseño y, sobre todo, el stock disponible. Otro aspecto para tener en cuenta es que debemos usar drivers aislados, pues la referencia del puente H es diferente a la del resto del circuito.

Para usar el MOSFET como interruptor necesitamos que trabaje en zona lineal, es decir, que se cumpla la Ec.1:

$$V_{GS} - V_T > V_{DS} \quad (1)$$

Nos interesa la zona lineal pues la $R_{ds(on)}$ es la menor posible y, por tanto, la disipación de potencia será la menor posible, reduciendo la temperatura en el MOSFET. Sabiendo lo comentado, debemos proporcionar en la alimentación del driver la tensión precisa teniendo en cuenta que no tendremos elementos que proporcionen una subida de tensión en el disparo del MOSFET (más información sobre otra técnica de disparo de los transistores en el anexo 11.2). Teniendo en cuenta que la V_{ds} será de 12 V y la tensión umbral del transistor son 4 V, hemos optado por un driver que proporcione 18 V a 56 mA (corriente más que suficiente para polarizar la puerta del MOSFET). Según el datasheet del MOSFET elegido, el IRFR024NTRPBF de Infineon, la carga necesaria en la puerta del transistor para polarizarlo es de 20 nC, si dividimos ese valor entre los 56 mA que nos proporciona el DC/DC, obtenemos que la puerta se polarizará en 357 ns aproximadamente.

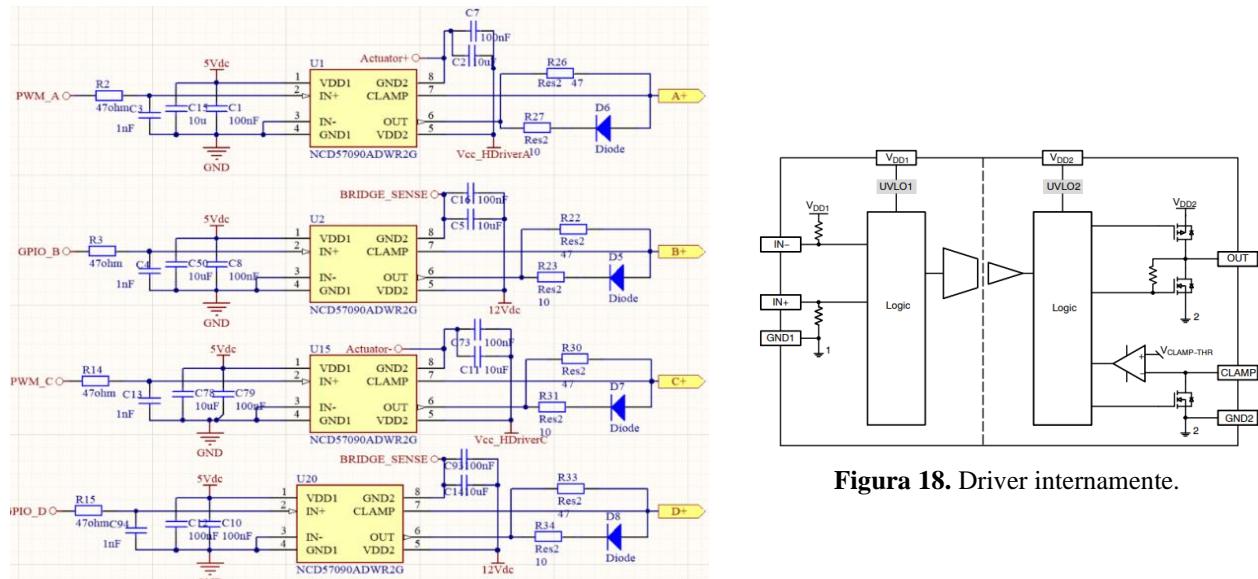


Figura 17. Esquema del driving del puente H.

Figura 18. Driver internamente.

Repasando la Figura 17, los componentes que rodean el driver han sido escogidos según la hoja de especificaciones. Estos incluyen un filtro RC en la entrada del driver (para asegurar que no tenemos ruido de alta frecuencia que pueda variar la señal), capacidades de desacoplo (para asegurar una estabilidad en la alimentación), una resistencia en la puerta del transistor (para limitar la corriente) y un diodo con una resistencia en paralelo a la anterior (para poder descargar la puerta más rápidamente una vez el transistor deba abrirse). Tal como vemos en la Figura 18, el driver tiene un pin llamado ‘CLAMP’, el cual tiene la finalidad de asegurar que cuando el driver no esté trabajando, el MOSFET conectado tendrá su puerta a 0V.

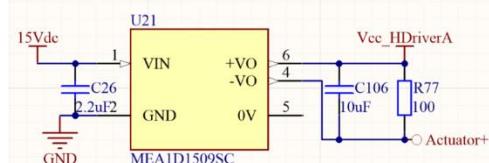


Figura 19. Esquema de DCDC que alimenta los drivers.

La Figura 19 muestra el convertidor que usamos, el MEA1D1509SC de Murata, para alimentar los dos drivers de la parte alta del puente. Una cuestión para comentar es la referencia (Actuator+) de la salida del convertidor. Se ha conectado directamente a la fuente del MOSFET del driver al que este convertidor alimenta. Si conectamos esa referencia a GND, no existe un camino de retorno para la corriente, lo que conllevaría a que el convertidor no funcionara. En ‘Actuator+’, una vez el MOSFET se cierre, tendremos 12 V, la puerta del transistor verá realmente 30 V: los 18 V de salida del DC/DC más los 12 V que atraviesan el MOSFET. No será un problema, pues lo que nos debe preocupar es la tensión V_{gs} , es decir, la tensión puerta – fuente, que serán los 18 V que realmente queremos inyectar en la puerta.

Otra cuestión para comentar es la inclusión de una resistencia entre los dos nodos +Vo y -Vo, dejando al aire la conexión con 0 V. La Figura 20 muestra el esquema interno de un DC/DC muy parecido al nuestro.

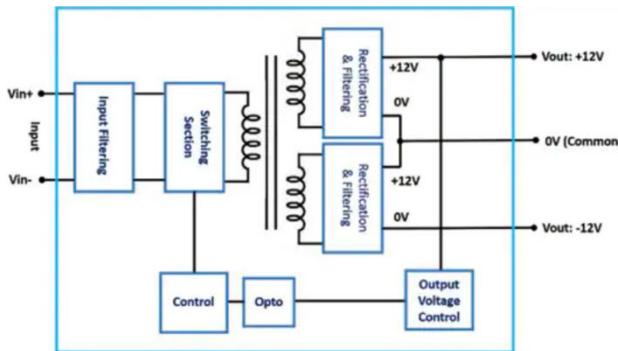


Figura 20. Esquema de un DC/DC que permite cortocircuitar las salidas para variar la tensión [9].

Como vemos, este ejemplo tiene 3 salidas: una negativa, el punto medio y otra positiva. Existen ciertos convertidores que permiten la conexión a GND del Vout- y, mediante una resistencia, unir dicha salida con la positiva (por si el convertidor necesita una pequeña precarga para empezar a regular), consiguiendo así convertir esas salidas en una sola del doble de tensión.

En el caso de la Figura 20 pasariamos de tener +12 V y -12 V a 24 V, con la misma potencia de salida; si antes teníamos 1 W de salida entre las dos ramas, ahora seguiremos teniendo 1 W en una sola rama, aunque sea una tensión superior. En nuestro caso, tendríamos +9 V y -9 V, pero siguiendo la técnica comentada, tendremos +18 V, más que suficiente para poder cerrar nuestros MOSFETs.

3.1.3. Detección de sobre corriente del puente H

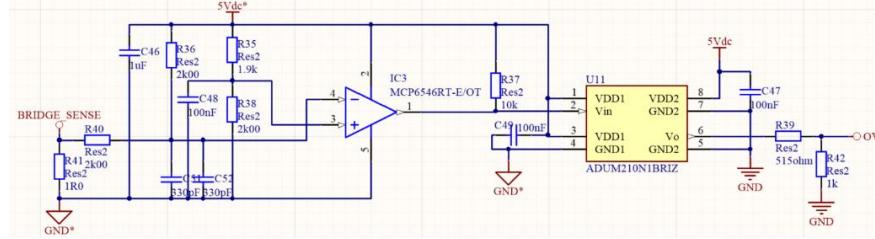


Figura 21. Esquema del circuito detector de sobre-corriente.

La señal de ‘Bridge Sense’ que se ha mencionado con anterioridad viene al circuito de la Figura 21. La señal será muy cercana a 0 y, para poder tratarla correctamente, mediante la resistencia ‘R36’ añadimos un ‘offset’ que centra la señal en 2.5V. Este ‘offset’ se suele añadir cuando se trata con señales AC, para evitar leer valores negativos, en nuestro caso trabajamos en DC, pero es una buena práctica, por tanto, se ha añadido igualmente. Lo que hacemos es usar un comparador que mirará la señal de corriente generada respecto a una referencia generada con el divisor resistivo formado por ‘R35’ y ‘R38’; si esa señal es superior a la de referencia se entenderá como una situación de sobre corriente, lo que producirá que en la salida del comparador haya un 0. El ‘U11’ es un trasladador de nivel aislado, para poder trasladar la señal con referencia en la GND del puente H a uno de los pines del micro con opción de GPIO, pues si leemos un 1 implica que el funcionamiento es correcto, mientras que un 0 implicaría un error, lo que se deberá traducir en el apagado inmediato de los drivers. El divisor de tensión en la salida del aislador es usado para poder reducir la tensión de 5V a 3.3V pues es lo que tolera el pin del microcontrolador.

Para poder ver de manera más visual el funcionamiento del circuito en una situación de sobre corriente, a continuación, se presenta la Figura 22 y 23 de la simulación en LTSpice del circuito de la Figura 21:

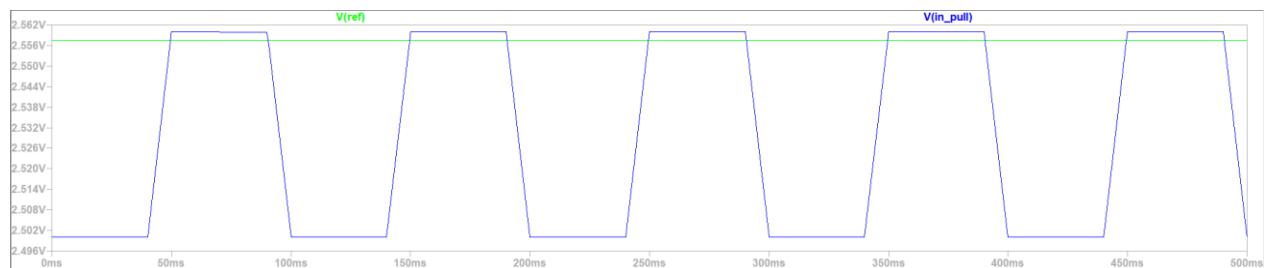


Figura 22. En azul, señal generada por la SHUNT (en este caso pulsos), en verde, entrada positiva del comparador.

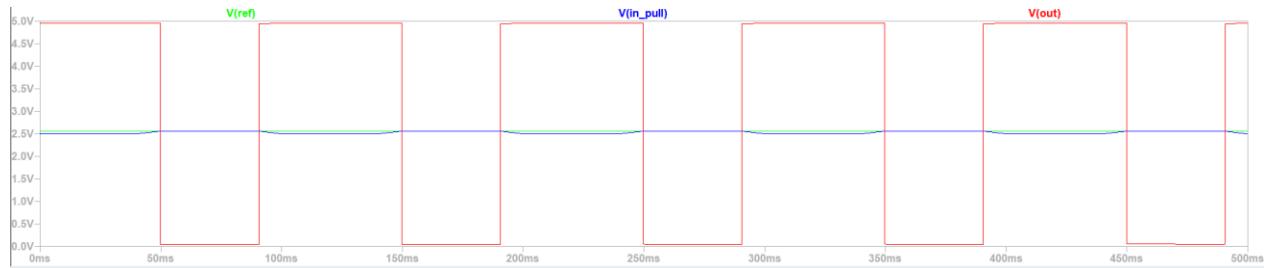


Figura 23. En azul, señal de la SHUNT. En verde, entrada positiva del comparador. En rojo, salida del comparador.

Como vemos, en el instante en el que la señal que proviene de la SHUNT supera el valor de la entrada positiva del comparador, éste proporciona un 0 en su salida.

Precisamos de 5V a 40mA para alimentar este módulo y los conseguimos con el regulador lineal que reduce la tensión de 12V a 5V a 100mA mostrado en la Figura 24.

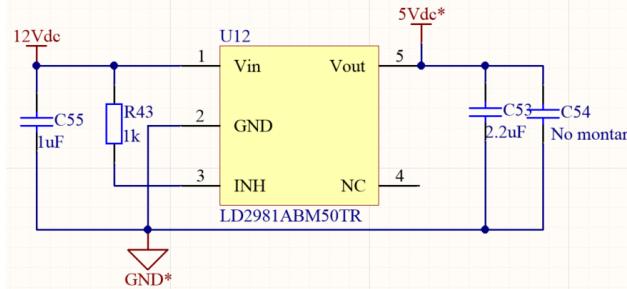


Figura 24. Regulador lineal que reduce 12 V a 5 V en DC.

Se han elegido los componentes según la recomendación de la hoja de especificaciones del fabricante. La resistencia de pull-up se utiliza para poder tener siempre activo el componente, ya que tendríamos la opción de desactivarlo, pero es función que no necesitamos. Los condensadores en la entrada y salida aportan estabilidad siempre y cuando tengan un valor de ESR (resistencia en serie equivalente) pequeña, ya que, de no ser así, el regulador podría oscilar.

3.2. Acondicionamiento de las señales de los sensores

3.2.1. LVDTs

Los LVDTs nos proporcionan una señal de 0-5 V según la extensión del núcleo. Como usamos el ADC integrado en el microcontrolador para convertir la señal analógica a digital, hemos de reducir estos 5 V a 3.3 V, pues es la tensión máxima que toleran los pines del controlador. Podríamos usar un divisor resistivo para ello, pero encontramos un problema: no limitamos de ninguna forma la corriente que proviene del sensor. Hemos optado por usar un amplificador diferencial con una configuración poco usual, ya que no lo usamos como amplificador, sino como atenuador. Un amplificador diferencial tiene el objetivo de amplificar la diferencia de tensión entre las dos entradas, es decir, si en la positiva tenemos 5 V y en la negativa 1 V, la salida será de 4 V (si no la amplificamos). Nosotros queremos que, si la salida iba a ser de 5 V, sea de 3.3 V. Jugando con las resistencias (las cuales poseen una tolerancia muy pequeña), podemos conseguir dicho objetivo con el circuito de la Figura 25.

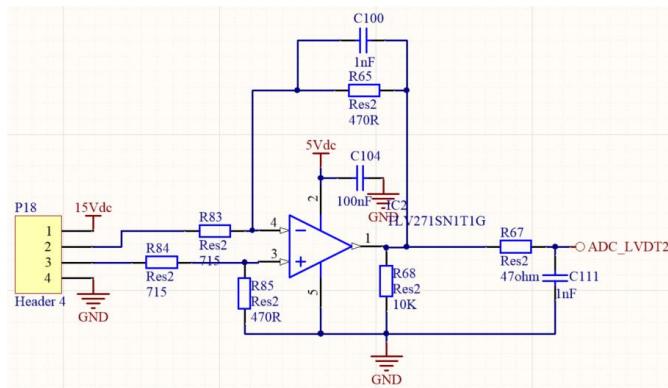


Figura 25. Esquema del amplificador diferencial.

La capacidad en paralelo 'C100' en un principio no se ha montado, tiene el objetivo de mover el polo en caso de necesitarlo, por compensación Miller de polo dominante.

3.2.2. Sensor de presión del agua

Para el sensor de presión del agua seguimos la misma estrategia que con los LVDTs. La señal también será de 0-5 V y la adaptamos con un amplificador diferencial. En este caso, la particularidad es que sólo nos proporciona una salida, es decir, no nos da una referencia para restar, por tanto, la entrada negativa del OPAMP la conectamos a GND, teniendo en cuenta que la corriente de vias en ambas entradas debe ser la misma.

3.2.3. Celdas de carga

Hemos diseñado un circuito algo más complejo que los anteriores, tal como vemos en la Figura 26. La señal de salida de los transductores es de $2\text{mV/Kg}\cdot\text{V}$, es decir, que nos dará 2 mV por cada voltio y kilogramo aplicado. Es un valor demasiado pequeño para poder ser captado por un ADC de 12 bits, como es el del microcontrolador. Hemos optado por una primera etapa de amplificación con un amplificador de instrumentación. La ventaja de este es que nos permite una alta ganancia y eliminamos el modo común, el cual podría ser un gran problema en una señal tan pequeña. La celda nos facilita su propia referencia, hemos optado por usar ADCs externos para poder aprovecharlo. El microcontrolador también permite una entrada para la referencia, pero en nuestro caso necesitaríamos dos pues tenemos dos celdas. Al colocar ADC externos, hemos optado por aumentar la resolución de estos a 14 bits, para poder tener más precisión en la lectura. Para poder extraer los datos del ADC, usamos el módulo SPI del microcontrolador, leyendo 3 bytes: 1 lleno de 0, otro con el MSB y un tercero con el LSB.

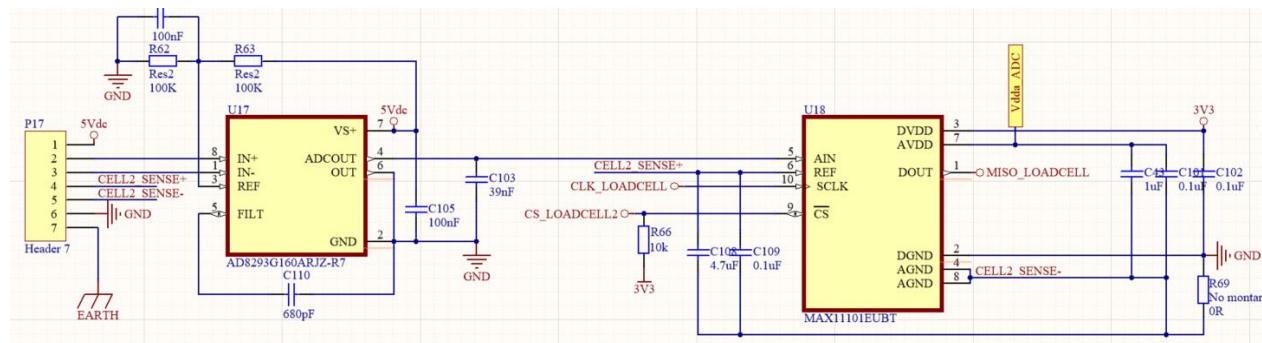


Figura 26. Esquema del circuito que acondiciona y convierte de analógico a digital los datos de la celda de carga.

Para realizar el circuito de la Figura 26 se han seguido las recomendaciones de los fabricantes. En el amplificador de instrumentación podemos apreciar dos salidas, la ‘OUT’ es la misma que la ‘ADCOUT’ pero sin filtrado, por eso hemos optado por usar la que saca la señal ya filtrada. Como vemos, se ha añadido una pequeña resistencia de $0\ \Omega$ en la referencia negativa del ADC para poder tener la opción de juntar las masas digital y analógica del ADC si se precisa necesario. Teóricamente, esa masa y la introducida en la celda son la misma (GND), pero para poder usar 4 cables para la medida hemos optado por conectar la referencia negativa de la celda directamente al ADC (CELL2_SENSE-).

3.2.5. Ultrasonidos

Respecto al sensor de ultrasonidos, necesitamos 2 módulos del microcontrolador: un puerto digital para proporcionar el ‘trigger’ al transductor y un ‘timer’ en modo captura. Este ‘timer’ recogerá el momento en el que el sensor envía la señal y el momento en que la recibe de vuelta, restando estos dos y sabiendo la velocidad del sonido en el aire, podemos saber la distancia del sensor al objeto. En la Figura 27 podemos apreciar cómo se ven las señales involucradas en una medida de la distancia.

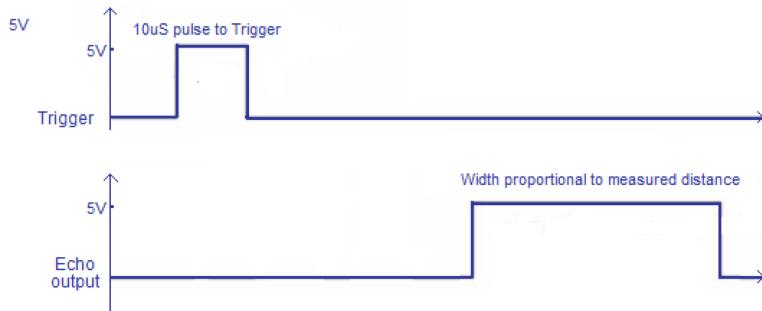


Figura 27. Señales para medida de la distancia en un sensor de ultrasonidos.

3.2.4. Alimentación

Montamos un regulador lineal para pasar de 15 Vdc a 5 Vdc; estos 5 V son usados por las celdas de carga, todo el circuito de acondicionamiento de señales de los sensores, el ultrasonidos y también para alimentar el regulador que, a su vez, alimenta al microcontrolador. El circuito diseñado se muestra en la Figura 28.

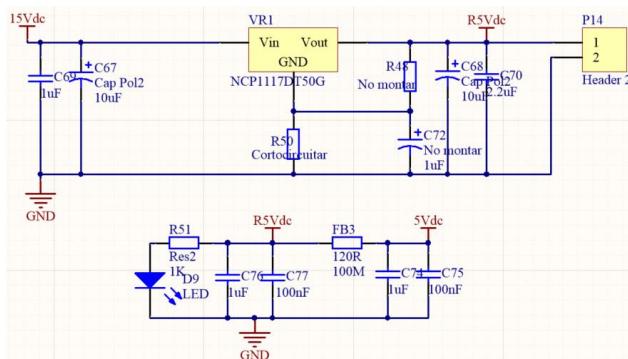


Figura 28. Esquema del regulador lineal que reduce la tensión de 15 V a 5 V en DC.

En nuestro esquema se indica que algunos componentes no deben montarse, pero se han colocado los ‘footprints’ en el PCB por si en algún momento nos interesa usar el modelo de la misma familia que permite una pequeña regulación de la salida. Este componente nos proporciona 1A de corriente a la salida.

Como vemos en la Figura 28 se ha incluido un pequeño circuito de filtrado, así como un LED indicador de que los 5 Vdc se están generando correctamente. Además, se incluye un conector que nos permite alimentar toda la parte de control introduciendo los 5 Vdc directamente, sin tener que conectar la fuente de 15 Vdc. Esto lo requeriremos, por ejemplo, en el momento de programar el microcontrolador, ya que no nos interesa tener al regulador trabajando; el añadido de este conector es exclusivamente para uso del programador.

3.3. MCU

3.3.1. Alimentación

Para conseguir la tensión de 3.3 V que requiere el microcontrolador, usamos un LDO que reduce la tensión de 5 Vdc conseguida por el regulador comentado en el apartado de acondicionamiento de señales de los sensores.

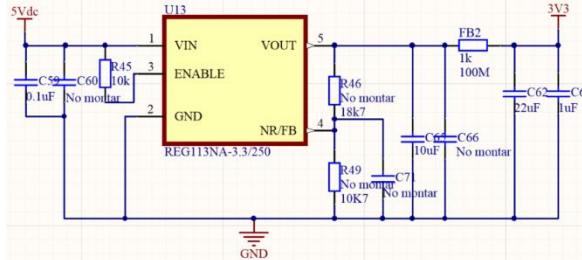


Figura 29. Esquema del LDO que reduce la tensión de 5 V a 3.3 V en DC.

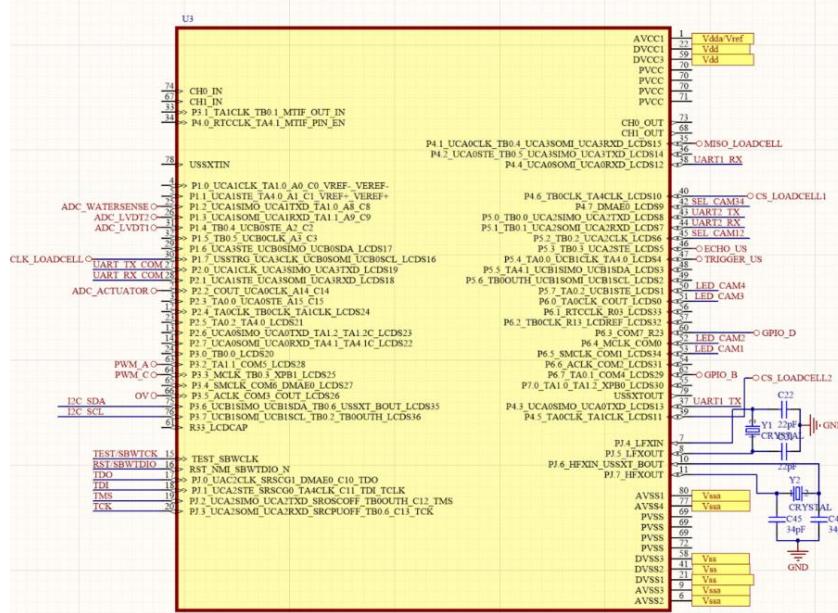
Como vemos en la Figura 29, es muy parecido al caso comentado anteriormente, pero esta vez incluimos una ferrita (FB2) para el filtrado, ya que es muy importante que la tensión de alimentación del microcontrolador llegue lo más limpia posible.

3.3.2. Señales

El controlador usado es el MSP430FR6043 [10, 11], de TI. Es un controlador de la familia del MSP430, el cual permite la programación por Spy-By-Wire. Es una tecnología que usa únicamente 2 cables, a diferencia de los 6 del JTAG [12]. En el diseño hemos incluido las dos opciones, aunque con el MSP-FET (el programador y debugador del MSP430) podemos programar con los dos métodos, teniendo en cuenta que sólo podemos debugar a través de JTAG [13].

El microcontrolador posee dos entradas de XTAL, una de baja frecuencia (32kHz) y el otro de alta (hasta 24MHz). Hemos incluido los dos, aunque sólo acabemos usando el de menor frecuencia.

En la Tabla 2 encontramos un resumen de todas las señales que entran o salen del microcontrolador y en la Figura 30, el esquema del MSP430FR6043.



Señal	Funcionalidad	Pin
Vdda	Alimentación positiva de la parte analógica del microcontrolador	Power
Vdd	Alimentación positiva de la parte digital del microcontrolador	Power
Vssa	Alimentación negativa de la parte analógica del microcontrolador	Power
Vss	Alimentación negativa de la parte digital del microcontrolador	Power
ADC_WATERSENSE	Señal acondicionada del sensor de presión	ADC
ADC_LVDT1	Señal acondicionada del LVDT en horizontal	ADC
ADC_LVDT2	Señal acondicionada del LVDT en vertical	ADC
CLK_LOADCELL	Reloj de la comunicación SPI con los ADC externos	SPI
MISO_LOADCELL	MISO de la comunicación SPI con los ADC externos	SPI
CS_LOADCELL1	‘Chip select’ de la comunicación SPI con uno de los ADC externos	GPIO
CS_LOADCELL2	‘Chip select’ de la comunicación SPI con uno de los ADC externos	GPIO
UART_TX_COM	Línea de envío de datos de la comunicación UART con el PC	UART
UART_RX_COM	Línea de recepción de datos de la comunicación UART con el PC	UART
ADC_ACTUATOR	Señal del ‘feedback’ del actuador	ADC
PWM_A	Señal PWM del transistor del puente H etiquetado como ‘A’	TIMER
PWM_C	Señal PWM del transistor del puente H etiquetado como ‘C’	TIMER
GPIO_D	Señal digital del transistor del puente H etiquetado como ‘D’	GPIO
GPIO_B	Señal digital del transistor del puente H etiquetado como ‘B’	GPIO
OV	Señal del circuito de detección de sobre corriente en el puente H	GPIO
I2C_SDA	Línea de datos de la comunicación I2C con un dispositivo externo	I2C
I2C_SCL	Línea de reloj de la comunicación I2C con un dispositivo externo	I2C
TEST/SBWTC	Una de las 6 señales que forman el JTAG para programar el micro	JTAG
RST/SBWTDO	Una de las 6 señales que forman el JTAG para programar el micro	JTAG
TDO	Una de las 6 señales que forman el JTAG para programar el micro	JTAG
TDI	Una de las 6 señales que forman el JTAG para programar el micro	JTAG
TMS	Una de las 6 señales que forman el JTAG para programar el micro	JTAG
TCLK	Una de las 6 señales que forman el JTAG para programar el micro	JTAG
UART1_RX	Línea de recepción de datos por UART para la cámara 1 y 2	UART
UART1_TX	Línea de envío de datos por UART para la cámara 1 y 2	UART
SEL_CAM34	Señal digital para la selección de la cámara 3 o 4	GPIO
UART2_TX	Línea de envío de datos por UART para la cámara 3 y 4	UART
UART2_RX	Línea de recepción de datos por UART para la cámara 3 y 4	UART
SEL_CAM12	Señal digital para la selección de la cámara 1 o 2	GPIO
ECHO_US	Señal que devuelve el sensor de ultrasonidos	TIMER
TRIGGER_US	Señal para iniciar una medida del sensor de ultrasonidos	GPIO
LED_CAM4	Led de estado de la cámara 4	GPIO
LED_CAM3	Led de estado de la cámara 3	GPIO
LED_CAM2	Led de estado de la cámara 2	GPIO
LED_CAM1	Led de estado de la cámara 1	GPIO

Tabla 2. Señales conectadas al microcontrolador.

3.4. Cámaras

3.4.1. Alimentación

Las cámaras requieren de cierta potencia (100 mA a 5 V) cuando están trabajando y se ha optado por proporcionar un generador propio para no provocar caídas en la línea de 5 Vdc de los sensores y el microcontrolador. El esquema es muy parecido a los anteriores, se ha diseñado según recomendaciones del fabricante; lo vemos en la Figura 31.

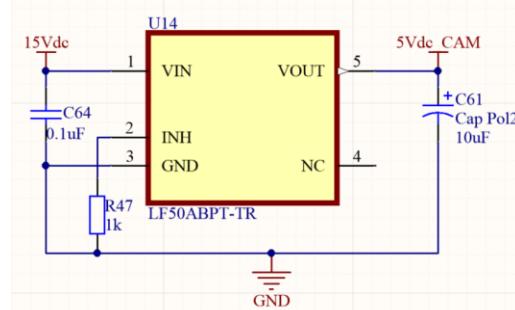


Figura 31. Regulador lineal que alimenta las cámaras y los Arduino.

3.4.2. Multiplexación de canales UART y driver RS233

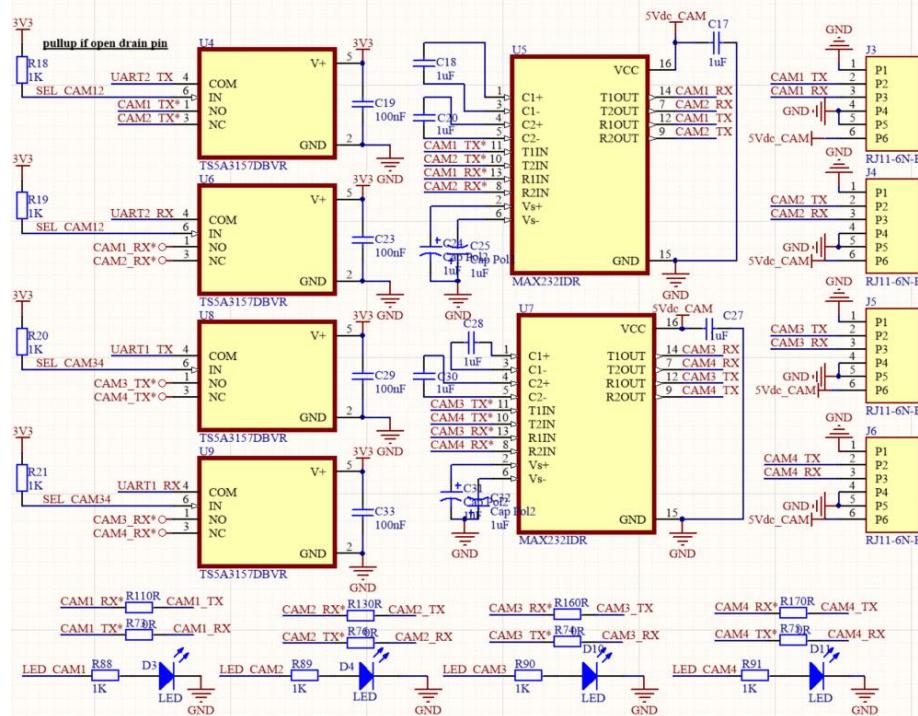


Figura 32. Esquema del circuito encargado de la comunicación con las cámaras.

Como se ha comentado anteriormente, el microcontrolador posee 3 canales de UART.; pero necesitamos un total de 5: 4 para las cámaras y 1 para la comunicación con el ordenador. Hemos optado por un multiplexor digital para poder aprovechar los 2 canales UART que tenemos disponibles, pues uno de ellos está dedicado a la comunicación con el PC. El esquema interno del multiplexor digital es el de la Figura 33.

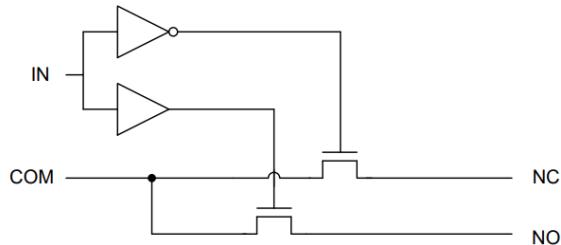


Figura 33. Esquema interno de los multiplexores digitales.

Se trata de puertas de paso controladas por una señal digital. Este diseño permite que dicho componente sea bidireccional, lo cual es idóneo para nuestro propósito.

En cuanto a los integrados ‘U5’ y ‘U7’ de la Figura 32, son drivers que nos ayudan a traducir la señal proporcionada por el microcontrolador a niveles RS-232 para la comunicación UART, el cual es el protocolo usado por las cámaras. Los niveles RS-232 permiten una mayor seguridad al momento de las transacciones, los niveles de tensión son relativamente altos para este contexto ($\pm 15V$).

Aunque se ha implementado en la PCB todo el circuito para la comunicación con las cámaras, en el apartado de resultados comentaremos que no usamos dicho circuito, pues controlaremos las cámaras con Arduino, para mejorar la eficiencia del sistema. Por tanto, usamos las resistencias de $0\ \Omega$ que añadimos por si esa decisión se acababa tomando. Dichas resistencias tienen el objetivo de ‘saltar’ el driver RS232. Usamos los pines en modo puerto digital, para proporcionar un ‘trigger’ que avisará a los Arduino que recojan una foto de las cámaras.

3.5. Software

En este subapartado veremos la capa de control y la capa de usuario, es decir, la parte ‘software’ del sistema:

1. El código en C del microcontrolador.
2. El código en Arduino para el control de las cámaras.
3. El código en ‘Python’ para la interfaz de usuario.

3.5.1. Microcontrolador

Se ha usado el entorno propio de TI: el Code Composer Studio. Tenemos un total de 6 archivos. No explicaremos cada una de las funciones pues el código se adjunta en el anexo 11.5 y está debidamente comentado, junto con un diagrama de flujo de la función principal (anexo 11.6). Hemos intentado juntar en la misma librería las funciones que usen recursos parecidos:

- ADC.c: incluye todas las funciones relacionadas con el ADC, desde la configuración del módulo hasta la recolecta de datos de los sensores.
- Clocks.c: incluye la función de configuración de los relojes. Usamos un cristal externo que nos proporciona la frecuencia del ACLK, pero el SMCLK y el MCLK proceden del DCO interno.
- DrivingH: incluye las funciones relacionadas con el puente H y el sensor de ultrasonidos. Hemos optado por configurar el ultrasonidos aquí pues lo usamos como método de seguridad para saber si la estructura ha llegado a su punto máximo y apagar el puente.

- COMs.c: incluye todas las funciones relacionadas con las comunicaciones; tanto con las cámaras, como con los ADC externos de las celdas de carga y con el PC.
- Control.c: incluye las funciones principales. Una de ellas es la que llamamos desde el ‘main’ cada vez que recibimos algún mensaje por UART y es la que usará las librerías según el comando recibido.
- Main.c: es el archivo que se ejecuta al iniciar el microcontrolador. Comienza con las inicializaciones de los módulos para acabar en un bucle infinito que mira repetidamente el puerto UART a la espera de un comando.

Como hemos comentado, no adjuntaremos partes del código en la memoria, pues la haría innecesariamente extensa teniendo en cuenta que se encuentra comentado; pero sí creemos conveniente comentar que el sistema parte de una función de tipo ‘fetch’.

El microcontrolador inicia esperando algún comando desde el PC. La función de tipo ‘fetch’ comprueba qué se ha recibido y, si coincide con algún comando aceptado, se actuará en consecuencia llamando a las funciones de las librerías correspondientes.

Nos hemos asegurado de incorporar las máximas protecciones posibles a nuestro sistema, por ejemplo: que la estructura no pueda recorrer más de 10 mm, que no suba más del 20% del duty cycle en los PWM (según recomendaciones del fabricante) o si se recibe un comando erróneo que el usuario se percate. Hemos incorporado dos LEDs de estado, uno rojo y otro verde, que informen al usuario del estado del sistema. A continuación, encontramos la Tabla 3 que explica el significado que cada estado posible de los LEDs.

LED VERDE	LED ROJO	SIGNIFICADO
ON	OFF	A LA ESPERA DE UN COMANDO
OFF	PARPADEA	ERROR ¹
ON	ON	PRIMER COMANDO OK, A LA ESPERA DEL SEGUNDO
OFF	ON	NO MANDAR COMANDOS, SISTEMA TRABAJANDO
PARPADEA	PARPADEA	ERROR DEL PUENTE H POR SOBRECORRIENTE
ON	PARPADEA	COMANDO ERRÓNEO DEL ACTUADOR, NO SE MOVERÁ.

Tabla 3. Estados posibles de los LEDs junto con su significado.

¹ En la guía de usuario del anexo 11.7. se explica detalladamente las posibles fuentes de error.

3.5.2. Arduino

Los Arduino tienen el objetivo de recoger los datos proporcionados por las cámaras y grabarlos en una tarjeta SD. El código empieza comprobando si tenemos una tarjeta SD conectada y, si es así, comprueba si tenemos la cámara conectada. Si en cualquiera de estas dos comprobaciones detecta un fallo, no ejecutará más código. En caso de que estas dos comprobaciones se ejecuten correctamente, se procede a definir la resolución de la fotografía. A continuación, se pide una captura. Para finalizar, se graba dicha captura en la tarjeta SD. En la Figura 34 encontramos el diagrama de flujo del código.

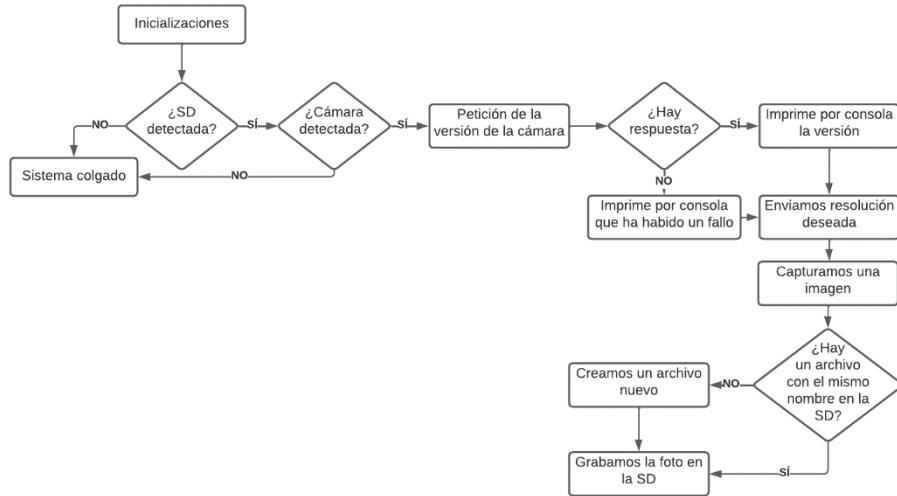


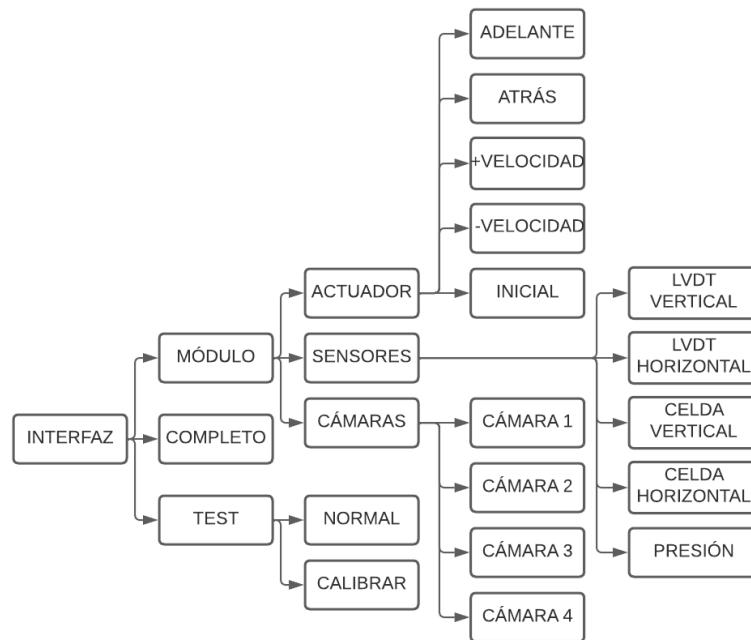
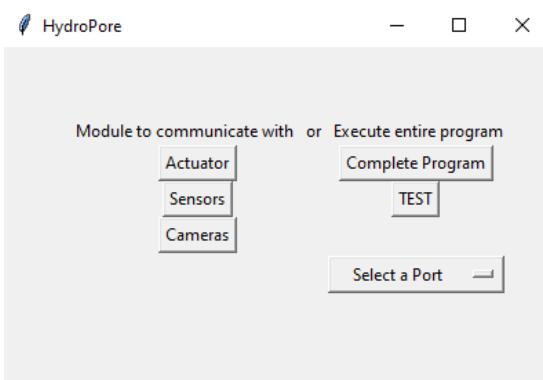
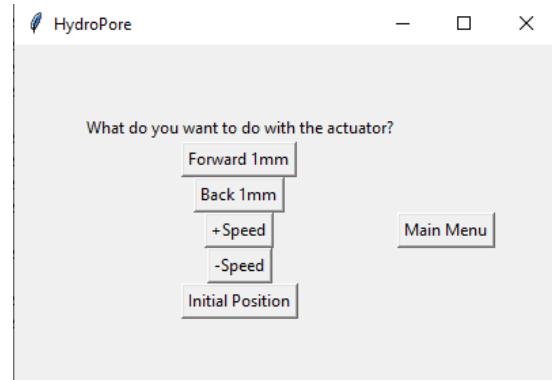
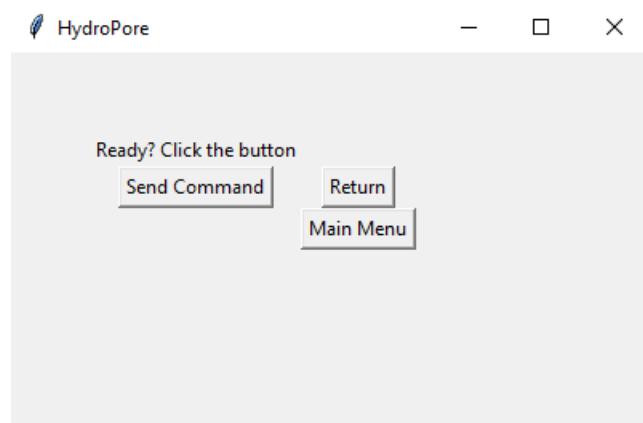
Figura 34. Diagrama de flujo del código en Arduino.

3.5.3. Software de la capa de usuario

La interfaz de usuario se ha desarrollado con los siguientes objetivos: enviar la instrucción al sistema, recibir los datos que nos tenga que proporcionar, procesarlos y guardarlos en un archivo de texto para su posterior estudio. Al abrir el archivo nos encontramos un menú que nos hace elegir si queremos comunicarnos con un módulo en particular (actuador, sensores o cámaras), si queremos ejecutar un programa completo (movimiento del actuador, recogida de datos de sensores y foto de las cámaras) o si queremos realizar un test del sistema (la Figura 36 muestra esta ventana y en la Figura 35 es el segundo nivel con las 3 opciones: MÓDULO, COMPLETO o TEST). Además, nos hace elegir el número (del 0 al 9) del puerto a través del cual realizaremos la comunicación.

Si queremos comunicarnos con un módulo en particular, se nos preguntará qué queremos hacer con el módulo. En el caso del actuador (Figura 37) podemos: ir hacia adelante 1 mm, hacia atrás 1 mm, subir la velocidad, bajar la velocidad y regresar a la posición inicial. Para el módulo de sensores podremos: tomar un dato del LVDT vertical, el horizontal, la celda horizontal, la vertical o del sensor de presión. Si es el módulo de las cámaras el que elegimos, deberemos escoger la cámara con la que queremos tomar la foto.

Si hacemos ‘click’ sobre el botón de TEST, deberemos escoger si queremos un ‘normal’, que implica tomar datos de todos los sensores sin mover el actuador o si queremos una calibración, es decir, definir la posición 0 del sistema. Cuando hayamos escogido la instrucción que queremos mandar, aparecerá un menú que nos invita a ‘enviar el comando’ (Figura 38). Cabe mencionar que en cualquier momento podemos regresar a la pantalla anterior o al menú principal.

**Figura 35.** Flujo de ventanas de la interfaz.**Figura 36.** Ventana principal de la interfaz.**Figura 37.** Ventana del actuador.**Figura 38.** Ventana de envío de comando.

4. VIABILIDAD TÉCNICA

En este apartado analizamos el DAFO de nuestro proyecto, es decir, las debilidades, las amenazas, las fortalezas y las oportunidades.

4.1. Debilidades

Nuestra comunicación UART no ejecuta ningún protocolo de seguridad tipo bit de paridad o CRC. Es un riesgo pues podríamos llegar a recibir tramas erróneas y darlas por correctas. Para subsanar el problema, el software de nuestro microcontrolador tiene una protección y es que, si en algún caso recibiéramos un comando incorrecto, simplemente avisaría al usuario mediante los LEDs, pero en ningún caso el sistema debería quedarse encallado. Con respecto a las tramas enviadas desde el microcontrolador, no tenemos manera de asegurarnos de que la trama recibida es correcta; el sistema estará montado en un espacio poco hostil y la distancia de la comunicación será de apenas 20 cm, no deberíamos tener problemas de ruido o tramas manipuladas involuntariamente.

4.2. Amenazas

La crisis de aprovisionamiento de vivimos es una gran amenaza a nuestro proyecto. En la fase de aprovisionamiento de material, en abril de 2022, cuando compramos el microcontrolador, el proveedor nos aseguró que hasta junio de 2022 no podrían enviarnos el material. Finalmente pudimos aprovisionar por otra vía, pero esto nos hace pensar que, en unos meses, si por algún motivo uno de nuestros componentes necesita un reemplazo y no tenemos disponibilidad, tendremos un grave problema, ya que encontrar componentes que coincidan en el ‘pinout’ y en características eléctricas no es tarea fácil.

4.3. Fortalezas

Un punto fuerte para comentar de nuestro sistema es la versatilidad. Se ha diseñado de cierta forma, para ser usado con unos sensores específicos, pero en un futuro, si por algún motivo se quiere cambiar algún sensor por la necesidad de más precisión, si se respecta la tensión de alimentación y el rango de la salida de este, podremos intercambiarlo y el sistema no necesitará de ajustes.

Otro punto fuerte para comentar es la facilidad de interacción con el sistema. Toda la electrónica y el software son transparentes para el usuario. Para poder realizar medidas del sistema, el usuario sólo debe preocuparse de indicar, mediante los botones de la interfaz, qué es lo que quiere hacer, sin necesidad de saber cómo se hace.

4.4. Oportunidades

Por cuestiones de tiempo, se ha llegado hasta la ‘fase A’ del proyecto. En la ‘fase B’ es cuando se hacen mejoras y correcciones de la primera versión; aun así, nuestro diseño es plenamente funcional.

Podríamos mejorar el circuito de detección de sobre corriente con un driver que permitiera apagar el puente por hardware, sin pasar por el microcontrolador. Esto nos permitiría reducir los daños en el sistema gracias a que pararíamos el consumo de potencia mucho más rápido.

Los LEDs informativos podrían ser sustituidos por una pantalla LCD que mostrara al usuario mensajes del estado del sistema.

Podríamos evitar usar dos fuentes y usar convertidores DCDC para conseguir las distintas masas.

Otra cuestión para comentar es que extraemos las imágenes de manera manual mediante una tarjeta SD, es decir, el usuario debe, con la mano, coger la tarjeta. Podríamos aumentar el software para incluir la comunicación entre el PC y los Arduino.

5. CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN

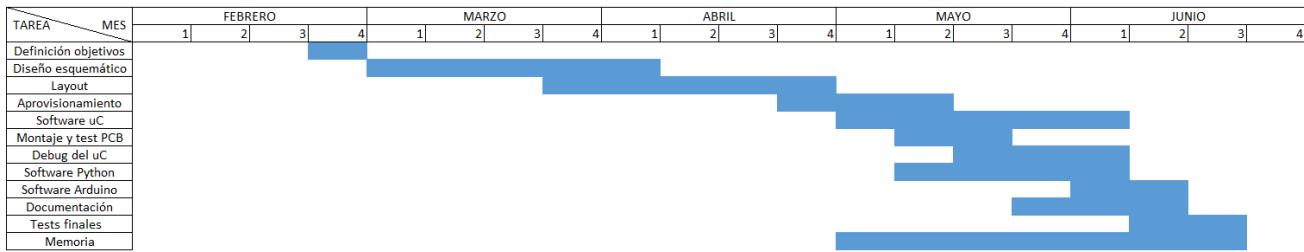


Figura 39. Diagrama del GANTT del proyecto.

En la Figura 39 se presenta el diagrama de GANTT del proyecto. Ha tenido una duración total de 16 semanas. El proyecto inicia con poco solapamiento entre tareas pues debemos realizar el estudio de la solución y la implementación de esta. Mientras esperamos la fabricación de las PCB, trabajamos en el software del microcontrolador ya que, al ser un controlador conocido, podemos avanzar en las configuraciones de los módulos. El hecho de poseer una placa de evaluación del ‘MSP430FR2355’ nos ha ayudado a poder probar ciertas partes del código.

Podemos apreciar que la tarea del ‘Esquemático’ y el ‘Layout’ se ha demorado más que otras tareas. El esquemático ha sido tedioso de realizar porque no disponemos de librerías de componentes, lo que nos ha obligado a, por cada componente colocado, hacer una búsqueda de su ‘footprint’ y un renderizado 3D. El ‘Routing’ no ha sido una subtarea fácil dentro del ‘Layout’; hemos tenido mucho cuidado para no tener problemas de ‘feedthrough’ y que la herramienta ‘DRC’ del programa de diseño devolviera las mínimas advertencias posibles.

6. VIABILIDAD ECONÓMICA

Dentro del costo total del proyecto no se incluye material como puede ser un soldador, osciloscopio o el programador, pues ya se disponía de ello. En el anexo 11.8 encontramos el material adquirido de manera más detallada, pero en la Tabla 4 vemos un resumen.

Artículo/Servicio	Precio
Actuador	215€
LVDTs	890€
Celdas de carga	900€
Sensor de presión	202.86€
PCB + Caja	100€
Componentes	783.40€
Ingeniero a jornada parcial	4000€
TOTAL	7091.26 €

Tabla 4. Resumen del coste de cada parte del proyecto.

7. RESULTADOS

En este apartado encontramos la explicación de los resultados obtenidos, así como los diversos problemas encontrados durante la etapa ejecución.

En la Figura 40 encontramos una imagen de la PCB con los distintos módulos etiquetados por colores, mostrando la capa TOP (en el anexo 11.3 encontramos imágenes de todas las capas). En la Tabla 5 encontramos a qué corresponde cada parte del PCB. Tenemos un total de 4 capas, sin planos, las 4 son para señales, aunque en las intermedias se añadido un plano bastante considerable para intentar apantallar las señales por TOP y BOTTOM. La primera capa se ha dedicado a componentes y señales más críticas, como son las de comunicaciones. La capa intermedia 1 se ha dedicado en mayor parte a las alimentaciones, para hacer llegar donde se necesiten los 3.3 V, los 5 V, los 12 V o los 15 V. También se ha usado para GPIOs en algún caso, donde no teníamos opción a ir por otra capa. La segunda capa intermedia se ha usado para señales no críticas, como pueden ser GPIOs. La capa ‘BOTTOM’ se ha usado para señales críticas, como puede ser el SPI de las celdas de carga o el XTAL de 16MHz añadido por si en algún momento nos hace falta.

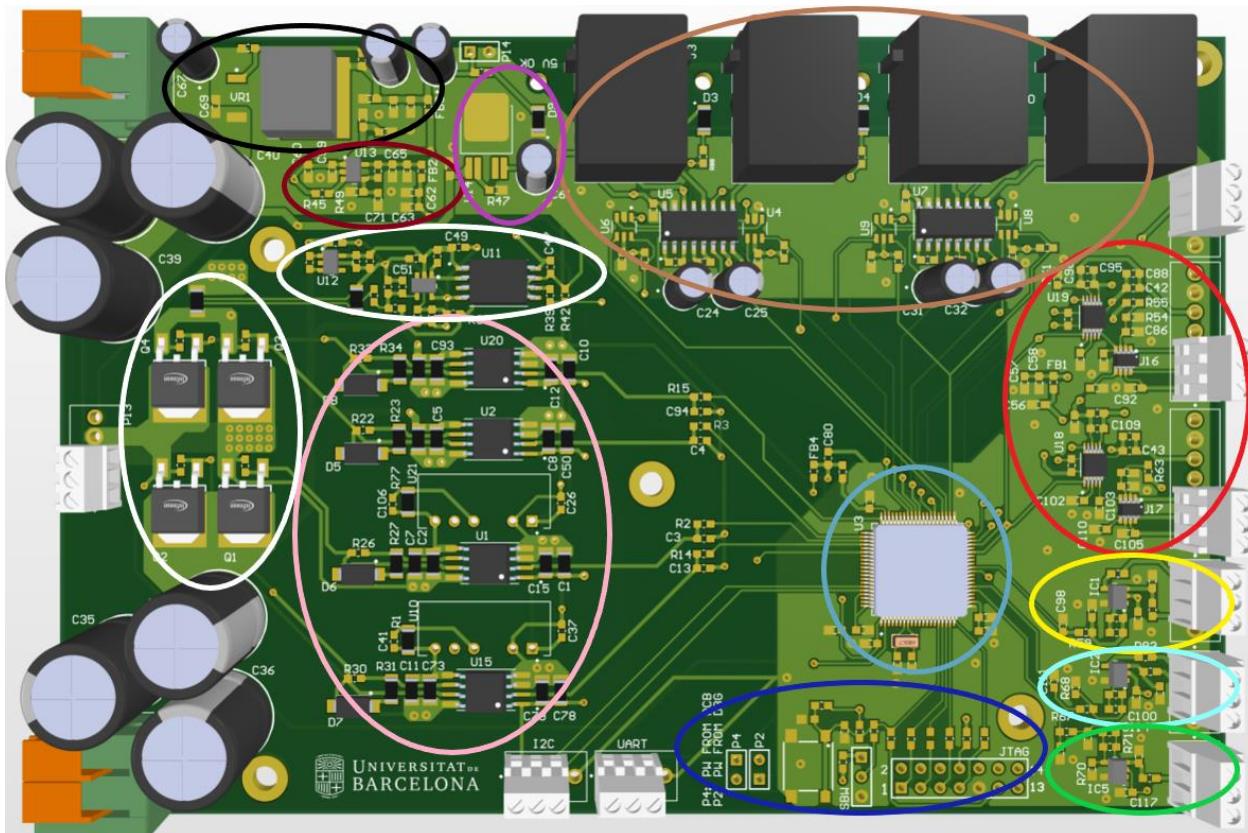


Figura 40. Representación 3D de la capa TOP del PCB.

COLOR	PARTES DEL SISTEMA
Black	LDO 15Vdc a 5Vdc para sensores, drivers del puente H y uControlador
Red	LDO 5Vdc a 3.3Vdc para el uControlador
Purple	LDO 15Vdc a 5Vdc para Arduinos y cámaras
Brown	Driver a RS232 y multiplexores digitales para las cámaras
White	Puente H y circuito de detección de sobre corriente
Pink	Drivers del puente H
Blue	Conejero de programación del uControlador
Light Blue	uControlador
Green	Acondicionamiento de la señal del sensor de presión
Cyan	Acondicionamiento de la señal del LVDT1
Yellow	Acondicionamiento de la señal del LVDT2
Red	Acondicionamiento de la señal de las celdas de carga

Tabla 5. Módulos del PCB etiquetados por colores.

El diseño se ha centrado en colocar el uControlador cerca de la zona de sensores para que la señal no recorra mucho espacio y pueda haber problemas de feedthrough (cuando dos señales distintas se encuentran muy juntas y se afectan entre sí). Como vemos, la zona de los sensores y la parte donde tenemos las conmutaciones y los PWM están bien alejadas, con el fin de evitar a toda costa que se afecten entre sí. Además, hemos colocado bien cerca del microcontrolador el conector de programación, por la misma razón que está cerca de los sensores: que la señal no se vea afectada por lo que tenga alrededor acortando el camino que recorre.

Una cuestión muy importante al momento de realizar el ‘routing’ ha sido el elegir bien los caminos de retorno de la corriente, sobre todo en el puente H y sus drivers.

Una peculiaridad importante de los LVDT que hemos usado es que para que la señal oscile entre 0 y 5 V, el núcleo debe estar completamente dentro del cuerpo del transductor, lo que obliga a hacer un pequeño adaptador que vaya enganchado al núcleo y lo une con la estructura. Además, la señal no va de 0 a 5 V exactos, sino hasta 5.8 V. Este hecho nos ha obligado a recalcular los valores de las resistencias de los atenuadores; hemos reducido las dos resistencias de $470\ \Omega$ a $392\ \Omega$. Si no llegamos a hacer este cambio, en el peor de los casos, hubiéramos inutilizado los pines de los ADC, pues toleran hasta 3.3 V.

Cometimos dos errores en la parte del sensor de ultrasonidos que pudimos subsanar durante la parte de test de la placa. El primero fue el no tener en cuenta que la señal ‘ECHO’ que debemos capturar con el microcontrolador es de 5 V, mientras que nuestros pines son tolerantes hasta 3.3 V. Pudimos arreglarlo añadiendo externamente un pequeño divisor resistivo siguiendo la Ec.2.

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (2)$$

Donde V_{out} es 3.3 V, V_{in} son los 5 V que nos devuelve el ultrasonidos, R_2 es $2k\Omega$ y R_1 es $1k\Omega$.

El segundo error tiene relación con las funciones de los pines. Conectamos el pin de ‘ECHO’ en el pin 46 del MCU, el cual tiene la función de timer en modo captura a través del timer B con el módulo 0. El pin de ‘TRIGGER’ lo conectamos en el pin 47, por el simple hecho de tener la función de pin digital y estar al lado del anterior. Tuvimos que conmutar las funciones de los dos pines, pues el timer B lo usamos para generar las señales PWM del puente H, y eso afectaría a la configuración del registro general del timer, es decir, al no usar en el mismo modo el módulo, no podemos compartir el timer para las dos funciones. Por tanto, pasamos a usar el timer 0 módulo 0 para realizar la captura, es decir, el pin 46 para el ‘TRIGGER’ y el 47 para el ‘ECHO’.

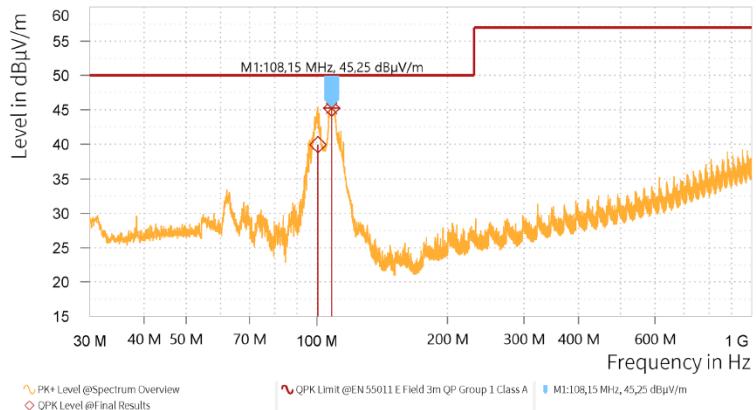
El problema viene cuando este pin en concreto no permite la configuración en modo captura, sólo comparación. Este contratiempo es más complicado de solucionar pues el pin no sirve para la necesidad que tenemos. El pin de al lado, el 48, puede usarse en modo timer y además permite la captura mediante el timer 4 módulo 1. Simplemente cortocircuitamos ambos pines para poder realizar el contacto.

En la parte de test de la placa, nos percatamos de que los drivers del puente H no se encienden, es decir, que llega bien la señal desde el microcontrolador, la parte de primario se alimenta correctamente y la del secundario también, pero el driver no da salida. Repasando la hoja de especificaciones vemos que la protección de sub-voltaje se activa por debajo de 12.5 V de valor típico, es decir, que no se encienden porque la alimentación de 12 V no es suficiente. Solucionamos el problema subiendo 1 V la salida de la fuente de 12 V, ya que nos permite cierto margen. Todos los componentes alimentados a 12 V permiten 13 V, por tanto, no hay problema alguno en realizar este ajuste.

Un reto al inicio del proyecto ha sido la comunicación UART del microcontrolador con las cámaras ya que no es eficiente. Tardaríamos cerca de 8 minutos en realizar todo el proceso: recibir la foto nos costaría 1 minuto y enviarla al ordenado, otro minuto; contando que tenemos 4 cámaras, sumaría un total de 8 minutos. Por este motivo añadimos la parte de los Arduino al proyecto, donde el único punto en contra es que el usuario deberá, manualmente, extraer al SD del módulo para poder guardar las imágenes en el ordenador.

Con el fin de simplificar el uso de todo el sistema para el usuario que lo maneje, se ha desarrollado una guía. En el documento se expone cómo controlar el sistema, las posibles causas de un error, el significado de los LEDs de advertencia, entre demás información relevante. El documento se encuentra en el anexo 11.7.

Para finalizar el proyecto, se ha realizado un estudio de EMCs del diseño; en el anexo 11.3 encontraremos más información sobre estas pruebas. Hemos priorizado la prueba de emisiones radiadas ya que emisiones conducidas, en nuestro caso, no es relevante al no conectar otro equipo al que poder ‘contaminar’. Alimentamos a los transductores con las fuentes SMPS, pero dichas fuentes ya deben cumplir la norma. Hemos realizado el test sobre la norma EN-55011:2016 (en el apartado de ‘Normativa’ encontraremos más información), que es la que tienen que cumplir todos los fabricantes de equipos eléctricos, electrónicos o electromecánicos, empresas eléctricas y usuarios del producto que quieran comercializar un equipo industrial, científico o médico. Los resultados de la prueba se encuentran en la Figura 41. En la Figura 42 podemos ver el montaje del equipo en la cámara semi anechoica.



EMI Final Results (1/2)

Rg	Frequency [MHz]	QPK Level [dBμV/m]	QPK Limit [dBμV/m]	QPK Margin [dB]	Correction [dB]	Polarization	Azimuth [deg]	Antenna Height [m]	Meas. BW [kHz]
1	100,500	39.92	50.00	10.08	12.29	V	-90	1,1	120,000
1	108,150	45.25	50.00	4.75	12.17	V	-90	1,1	120,000

EMI Final Results (2/2)

Rg	Frequency [MHz]	Meas. Time [ms]	Time of Meas.	Source	Comment
1	100,500	2,000,000	19:25:37	Critical Points	
1	108,150	2,000,000	19:25:41	Critical Points	

Figura 41. Resultado del test de emisiones radiadas.

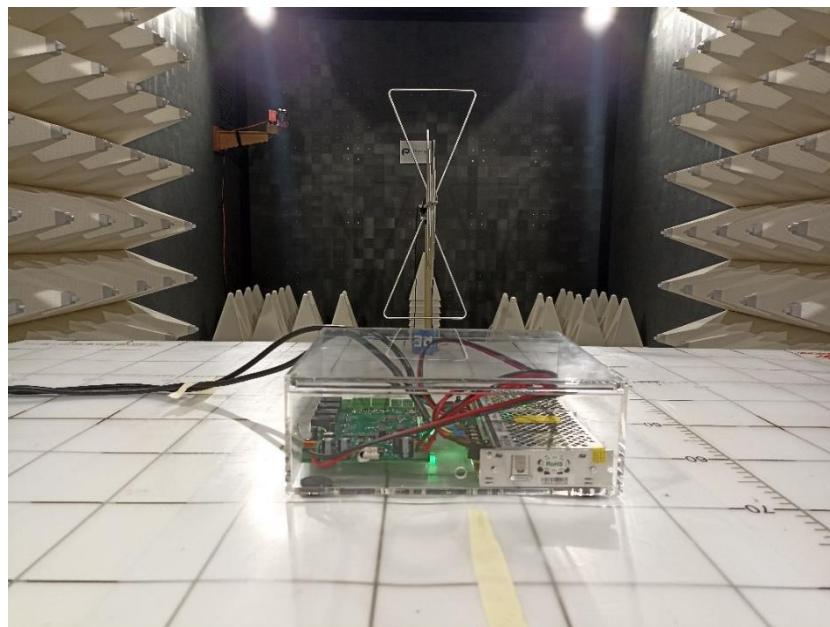


Figura 42. Equipo dentro de la cámara anecoica.

8. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha desarrollado el prototipo ‘A’ del sistema de control electrónico para el conjunto de transductores de la plataforma experimental ‘HydroPore’. De los resultados expuestos en la memoria, se concluye que:

La propuesta inicial presentada al investigador principal del proyecto ha sido aceptada y concuerda con los requisitos de operación de la plataforma.

La PCB desarrollada integra todo el hardware necesario para alimentar y recoger los datos de los transductores que forman el sistema. Además, de cara a futuras mejoras, se incorporado un conector extra para añadir un dispositivo I2C y se ha redactado una guía de usuario con el objetivo de detallar ya no sólo como trabajar con el sistema, sino también cómo deberíamos cambiar un sensor en caso de necesitarlo.

La PCB desarrollada cumple con la normativa de emisiones radiadas UNE-EN 55011:2016/A2:2021, siendo el pico máximo de emisión 45,25 dB en 105,150 MHz, 4,25 dB por debajo del límite de la norma.

Se ha comprobado el correcto funcionamiento del sistema de actuación siendo capaz de mover la estructura en el rango requerido.

Se ha comprobado el correcto funcionamiento del acondicionamiento de señales de los LVDTs, el sensor de presión y las celdas de carga, siendo capaz de medir las magnitudes con la resolución requerida.

El software de control permite monitorizar el sistema y detectar errores, siendo capaz de advertir al usuario mediante unos LEDs de estado.

La interfaz de usuario desarrollada permite una interacción amigable con la plataforma a través de un sistema de ventanas y botones contextuales que enmascaran el formato de comandos a enviar.

9. NORMATIVA Y ASPECTOS LEGALES

Una normativa que debe cumplir el equipo es la UNE-EN 55011:2016/A2:2021. Define la compatibilidad electromagnética en general para equipos industriales, científicos y médicos.

Si este equipo tuviera aplicaciones ferroviarias y se utilizara sobre material rodante, deberíamos cumplir la norma UNE-EN 50155:2018. Ésta define aspectos como la temperatura, la humedad, los golpes, las vibraciones entre otros parámetros.

Además, deberíamos cumplir la norma UNE-EN 45545.2_2013+A1:2016, que define la protección contra el fuego de vehículos ferroviarios; además, define el comportamiento frente a fuego de los materiales y componentes.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Tyson. (21, Mar. 21). *How Scanners Work* [Online]. Disponible en: <https://computer.howstuffworks.com/scanner3.htm>
- [2] Actuonix Motion Devices Inc. (2016, Sept). *Miniature Linear Motion Series · P16* [Online]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/1cf0/0900766b81682dc9.pdf>
- [3] TE Connectivity. (2017, Jul.). *DC-SE Series, General Purpose DC LVDT* [Online]. Disponible en: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=DC_SE_General-purpose-DC-LVDT&DocType=DS&DocLang=English
- [4] Kitronik. (2021, Ene. 28). *Ultrasoni Ranging Module HC-SR04* [Online]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/8bc5/A700000007388293.pdf>
- [5] HBM. (2021, Ene. 26). *S2M Force Transducer Datasheet* [Online]. Disponible en: <https://www.hbm.com/fileadmin/mmediapool/hbm/doc/technical/B03594.pdf>
- [6] Sensata Technologies. (2021, Jun. 18). *IPS Series Industrial Pressure Transducer* [Online]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/165e/A70000008782550.pdf>
- [7] Adafruit Industries. (2016, Jun. 12). *PTC06 Serial Camera Specification* [Online]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/bb24/0900766b81533f88.pdf>
- [8] Dr. T.O. Hector Hugo. (2019, Jun. 9). *Amplificador Diferencial* [Online]. Disponible en: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/amplificador-diferencial/>
- [9] R. Huntley. (2019, Sept 10). *Achieving a Single Higher Voltage from a Dual-Output DC/DC Converter* [Online]. Disponible en: <https://www.mouser.es/blog/achieving-single-higher-voltage-from-dual-output-dc-dc-converter>
- [10] Texas Instruments. (2019, Ene.). *MSP430FR604x, MSP430FR504x 16-MHz MCU up to 64KB FRAM, 12-Bit High-Speed 8-MSPS Sigma-Delta ADC, and Integrated Sensor AFE* [Online]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr6043.pdf?ts=1655567113460&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [11] Texas Instruments. (2012, Oct.). *MSP430FR58xx, MSP430FR59xx, and MSP430FR6xx Family User's Guide* [Online]. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ug/slau367p/slau367p.pdf?ts=1655524175095>
- [12] Texas Instruments. (2010, Jul.). *MSP430 Programming with JTAG Interface* [Online]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ug/slau320aj/slau320aj.pdf?ts=1655485501995&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [13] Texas Instruments. (2015, Jul.). *MSP Debuggers User's Guide* [Online]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ug/slau647o/slau647o.pdf?ts=1655566972190&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [14] M. Santodomingo, J. Quintás. (2008, Abr. 8). *Mediciones EMC, Emisiones RF* [Online]. Disponible en: https://www.usc.gal/fagms/Docencia/cem%2007-08/trabajos/3_Mediciones%20EMC%2003.pdf

11. ANEXOS

En este apartado encontramos más información de ciertos aspectos de la memoria, así como también fotos de la PCB, el software, la guía de usuario de sistema y los documentos técnicos de los sensores.

11.1. Transductores

11.1.1. LVDTs.

Un LVDT ('Lineal Variable Differential Transformer') es un dispositivo electromecánico usado para convertir movimiento mecánico, específicamente movimiento rectilíneo, en corriente eléctrica, tensión o señales eléctricas medibles. Este transductor proporciona en su salida una magnitud, normalmente alterna, proporcional al desplazamiento de un núcleo.

Se compone de un bobinado primario, dos secundarios y un núcleo en el centro, tal como muestra la siguiente imagen:

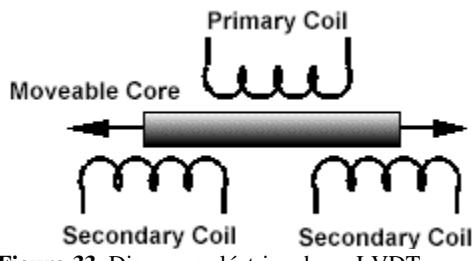


Figura 33. Diagrama eléctrico de un LVDT.

Cuando se introduce una tensión alterna en el primario, comienza a fluir corriente, lo que produce un campo magnético variable. Cuando el campo interactúa con el bobinado secundario, se induce un campo electromagnético en las bobinas secundarias. Si el núcleo está en el centro, el campo es equivalente en las dos bobinas secundarias. Cuando el núcleo se desplaza hacia la derecha, el flujo asociado a la bobina del secundario situada más a la derecha se vuelve mayor.

Encontramos diferentes tipos de LVDTs, pero los más usados son los siguientes:

1. Núcleo libre: el núcleo es una armadura tubular que puede moverse axialmente dentro del orificio y está acoplado mecánicamente al objeto cuya posición se quiere medir. No hay contacto físico entre el hueco y el núcleo, lo que permite una medición sin fricción aumentando así su vida útil. Una de las principales aplicaciones es la de medir el desplazamiento de un actuador lineal, por tanto, perfecto para nuestro objetivo.
2. Núcleo guiado: incorporan un sensor de posición inductivo sin contacto, lo que los hace ideales para aplicaciones en las que el sensor no deba estar en contacto con el objeto a medir. Una posible aplicación es la medición del movimiento transversal del eje de un objeto, por ejemplo, la redondez de una pieza giratoria.

11.1.2. Sensor de ultrasonidos

El principio de funcionamiento de este tipo de sensores es mediante un sonar, tal como los murciélagos. El transductor emite una onda inaudible para el ser humano (de 20kHz hacia delante) que rebota en el objeto y es recibida por el sensor. Sabiendo el tiempo entre la emisión y la recepción de la onda y la velocidad del sonido en el aire, podemos aproximar la distancia del sensor al objeto. Usamos este transductor para saber si la estructura ha llegado o no a cierto punto del recorrido; no podemos usarlo para saber exactamente su posición, pues la resolución no es muy precisa para nuestra aplicación, pues la estructura se mueve milímetros y la resolución mínima es de 3mm. Usamos un sensor muy usado, el HC-SR04.

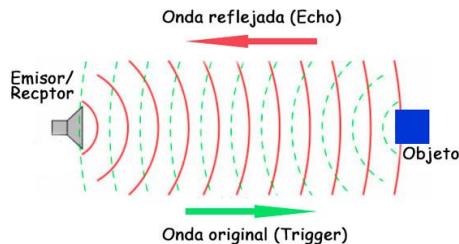


Figura 44. Principio de funcionamiento del sensor de ultrasonidos.

11.1.3. Celdas de carga

Una celda de carga es un transductor que convierte la fuerza aplicada sobre ella en una señal eléctrica medible; cuando se le aplica una fuerza, un elemento estructural se deforma y es la característica usada para saber qué fuerza es la aplicada. Habitualmente están basadas en un puente de Wheatstone. El funcionamiento es sencillo: en cuanto se aplica una fuerza sobre la celda las resistencias se desequilibran. Lo hacen de la misma manera las resistencias encaradas entre sí, es decir, si una de las resistencias se desequilibra, la del lado contrario lo hace de la misma manera mientras que las dos restantes lo hacen de manera opuesta. Si dos de ellas suben de valor, las dos otras lo reducen. En nuestro caso particular, dependiendo de si la fuerza es de compresión o de tensión, se desequilibrarán de una manera u otra, dando una señal negativa o positiva a la salida. La celda elegida para nuestras medidas tiene el siguiente esquema eléctrico:

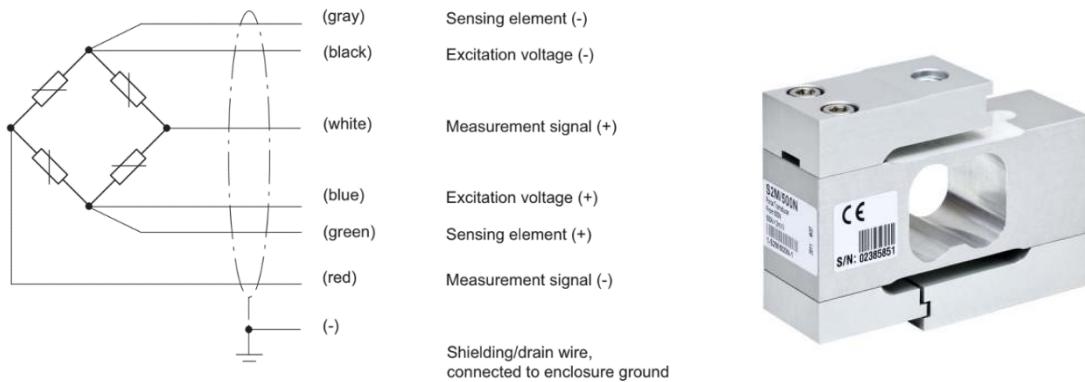


Figura 45. Modelo S2B de HBM.

Es un puente común con el añadido de dos cables para el sensado de la tensión de alimentación. Tenemos la opción de no usarlos, pero, como veremos, podemos usarlos como referencia de nuestro ADC obteniendo una medida más exacta.

Existen distintas formas en las que se presentan las celdas de carga: viga (pocos kilogramos a toneladas), punto único (3kg a 2t), anillo (250kg a 10t), botella (250kg a varios cientos de toneladas) y tipo S (de 25kg a 10t).

11.1.4. Sensor de presión del agua.

Es un transductor que convierte la presión sobre un objeto en una señal analógica medible. Encontramos diferentes tipos:

1. Resistivos: basados en el cambio de una resistencia mediante la deformación, la cual se produce a causa de la presión.
2. Piezoresistivo: la diferencia con los resistivos es que se usan semiconductores en lugar de metales como conductores, y la deformación provoca cambios en la resistividad.

3. Piezoeléctrico: basados en los efectos físicos que se producen en algunos cristales no conductores. Una vez comprimido, la superficie opuesta se polariza. La deslocalización de la estructura cristalina cargada produce un momento dipolar que se refleja en la carga de la superficie. La fuerza de la carga es proporcional a la fuerza por la presión, y la polaridad depende de la dirección. El voltaje generado por la carga superficial se puede capturar.
4. Capacitivo: basados en la medición de la capacitancia de un condensador, que cambia con la proximidad a la superficie activa. Para ello, se usa una película con dos placas metálicas que forman el condensador. La deformación de la membrana inducida por la presión acorta la distancia existencia entre las dos placas, aumentando la capacidad y manteniendo similar la constante dieléctrica y la superficie.

11.2. Puente en H

Una técnica muy común para conseguir la tensión adecuada de alimentación en los transistores altos de un puente H es la de ‘bootstrap’. Es una estrategia usada en sistemas que tengan más de una rama y vayan conmutando entre sí, es decir, si tenemos rama A, B y C, que una fase active el transistor alto en A y el bajo en B, la siguiente el alto de C y el bajo de A, etc.

Un condensador de valor dependiente de la tensión y la carga requerida en la puerta del transistor alto del puente se coloca entre la salida y la alimentación. Cuando la rama en cuestión esté inactiva, el condensador almacena energía a través del diodo. En cuando esa rama se active, el diodo cortará el paso de corriente y el condensador se descargará para cerrar el transistor alto.

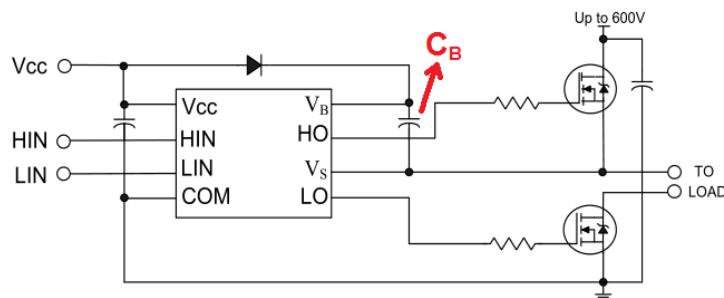


Figura 46. Esquema de un driver de medio puente de MOSFETs con la técnica de ‘bootstrap’.

En nuestro sistema no hay comutaciones continuamente. Tenemos dos ramas, la A y la B, en una fase se cerrará el transistor alto de A y el bajo de B y la siguiente a la inversa; pero no comutarán continuamente, una fase estará activa un período de tiempo, se cerrará y luego se producirá la siguiente. Debido a este hecho, la técnica del ‘bootstrap’ no resultaría, pues el condensador se descargaría una sola vez, pero se quedaría sin energía, lo que conllevaría que el transistor entrara en zona de saturación; el diodo volvería a polarizarse y la puerta del transistor vería directamente la tensión de alimentación del driver.

11.3. PCB

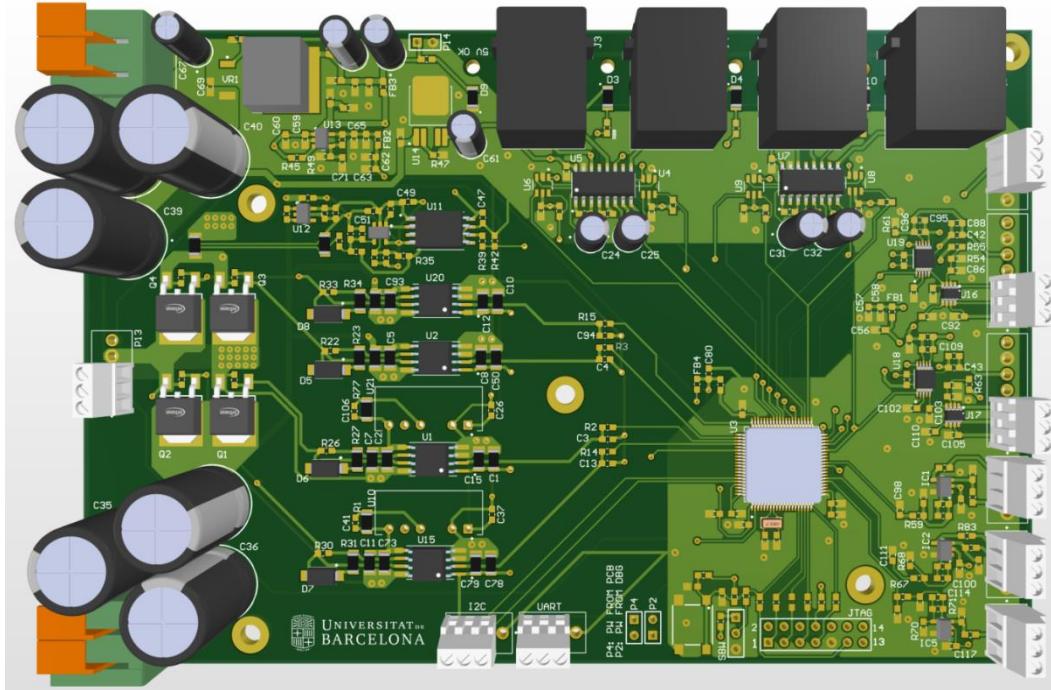


Figura 47. 3D de la capa TOP de la PCB.

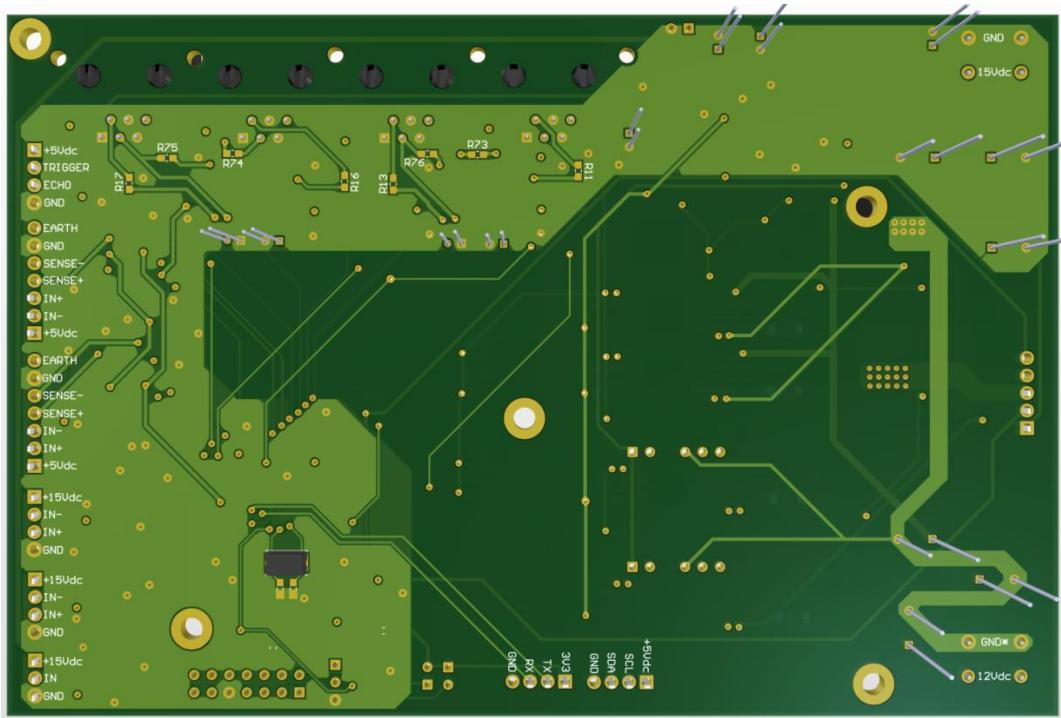


Figura 48. 3D de la capa BOTTOM de la PCB.

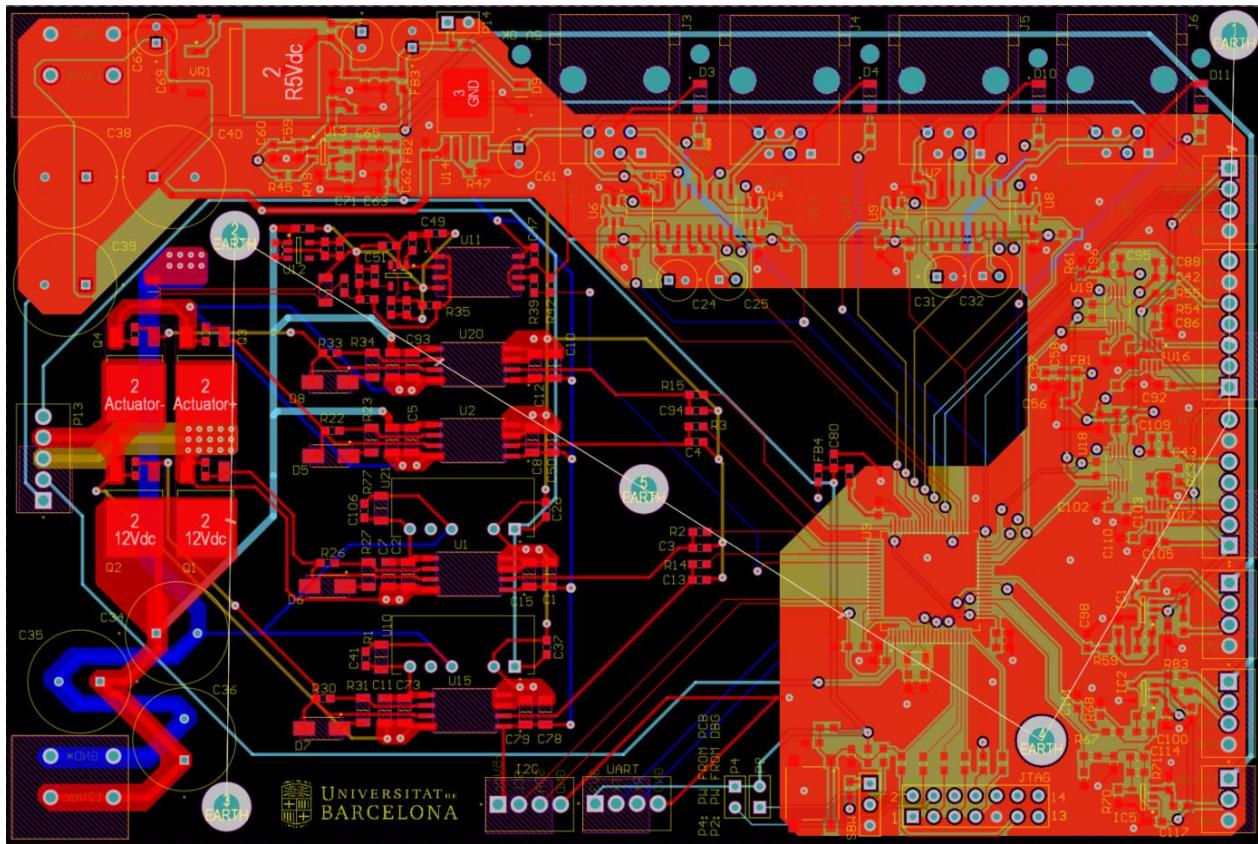


Figura 49. ‘Layout’ del PCB mostrando las 4 capas.

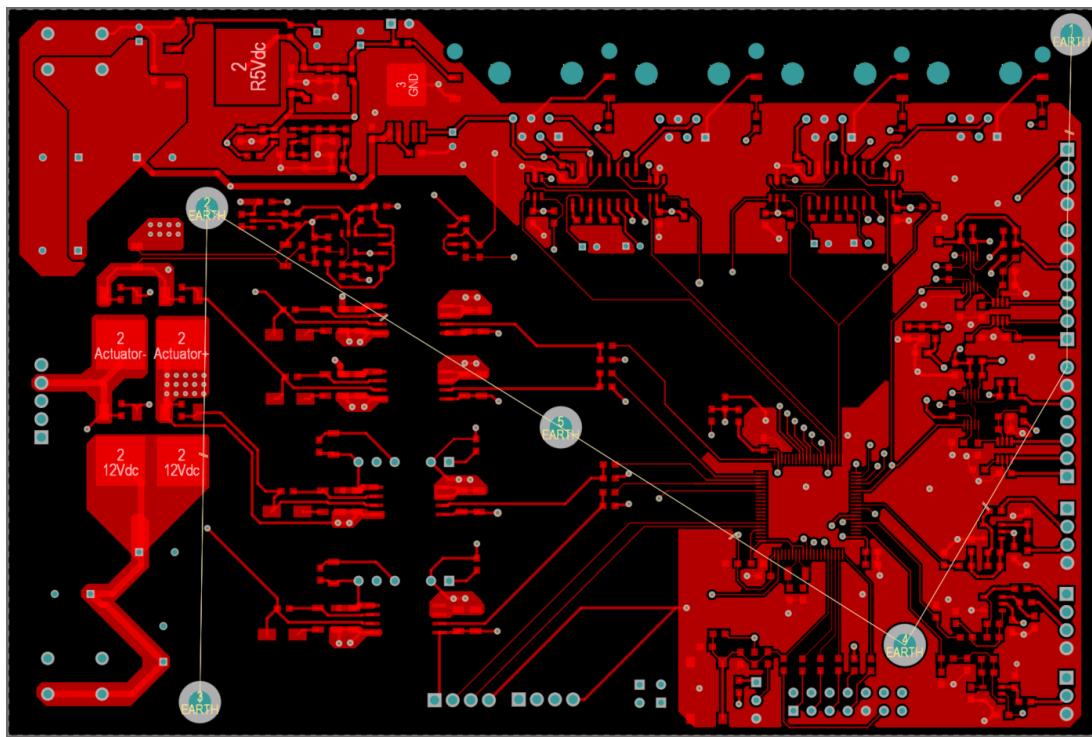


Figura 50. ‘Layout’ de la capa TOP del PCB.

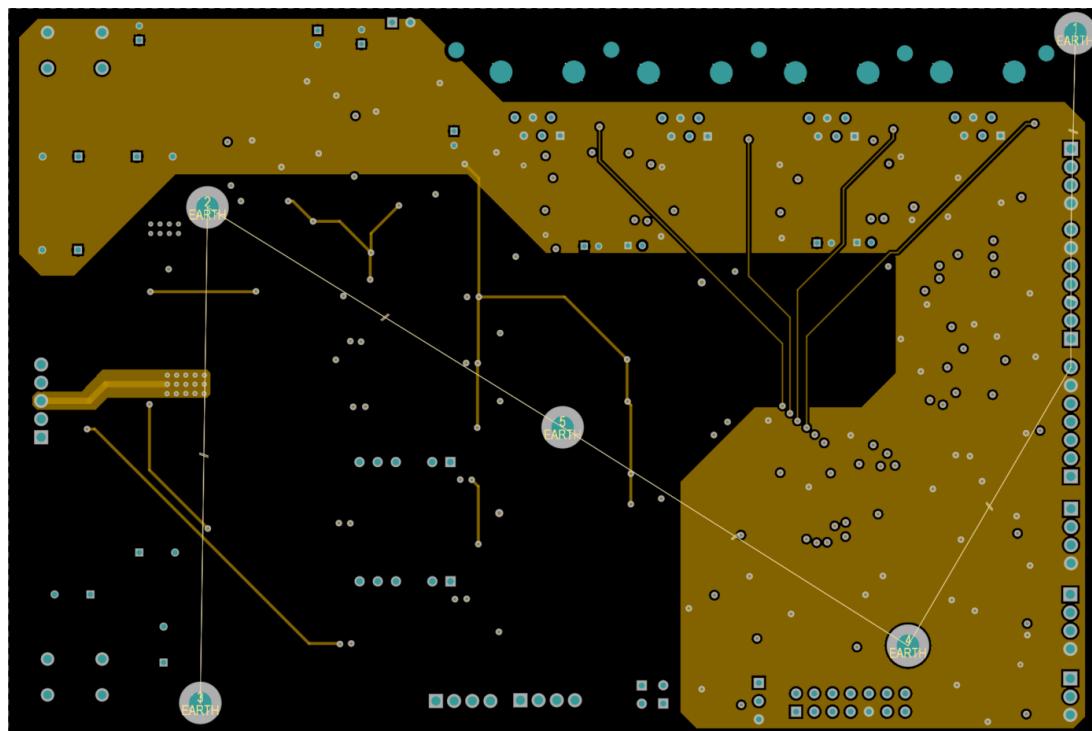


Figura 51. ‘Layout’ de la capa intermedia 2 del PCB.

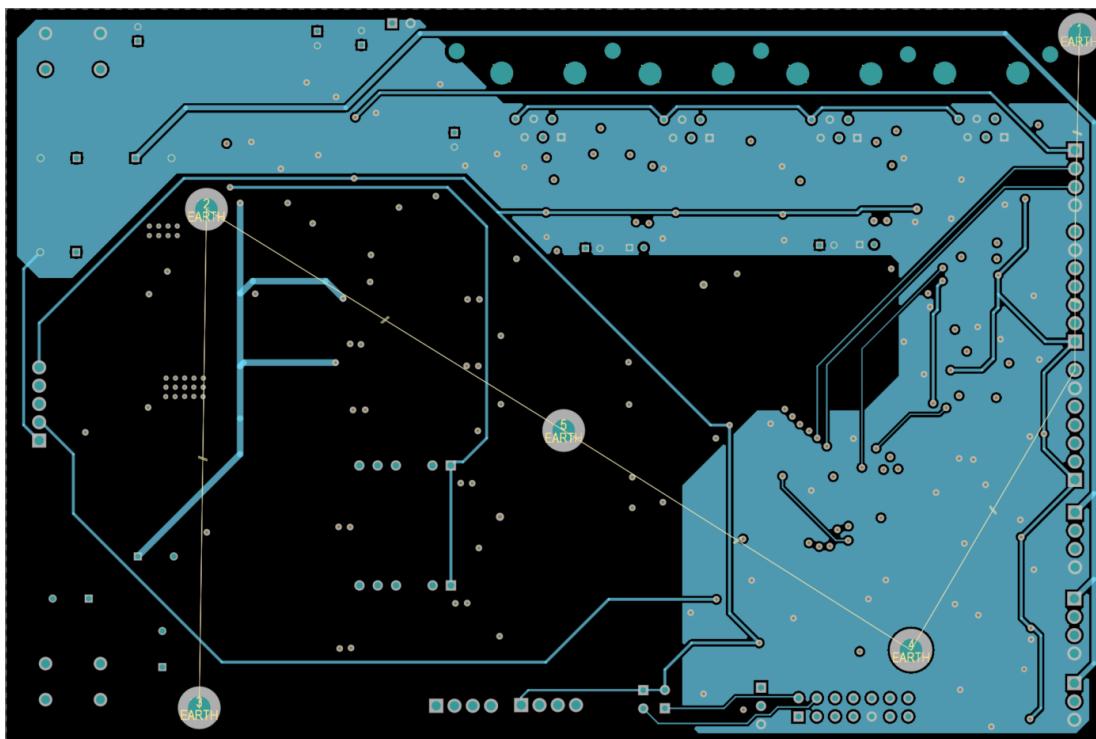


Figura 52. ‘Layout’ de la capa intermedia 1 del PCB.

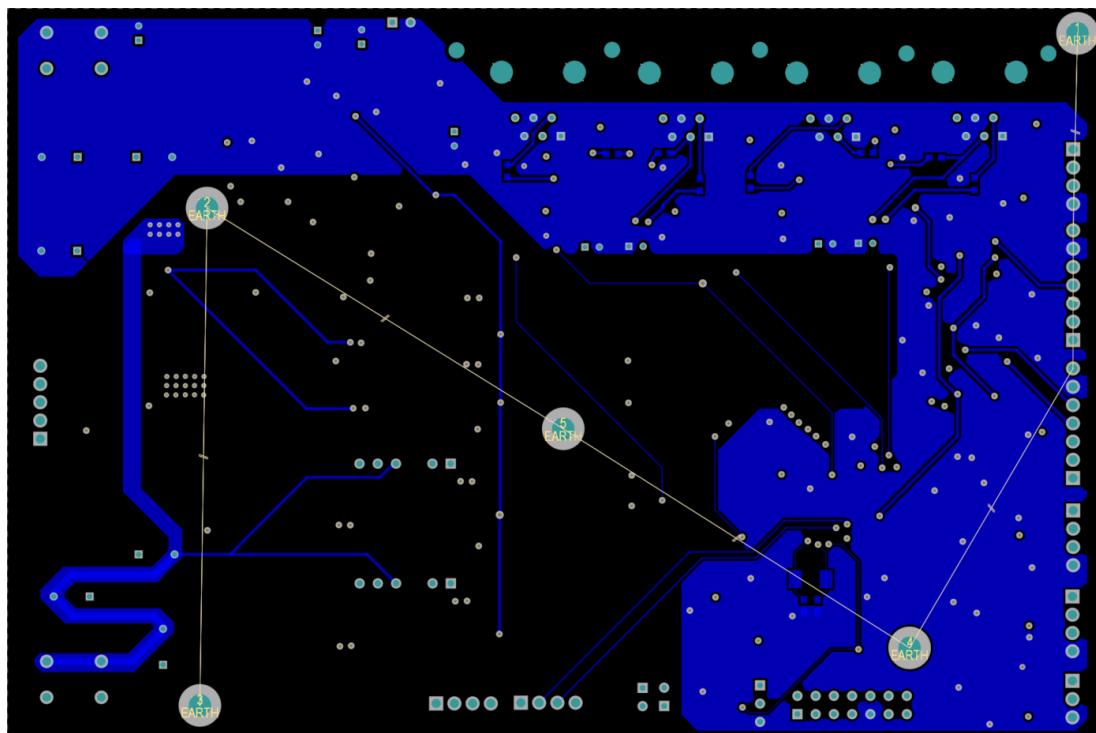


Figura 53. ‘Layout’ de la capa BOTTOM del PCB.

11.4. EMCs

Dentro de las emisiones RF encontramos 4 pruebas: las emisiones radiantes (por encima de 30MHz), las emisiones conducidas (por debajo de 30MHz), la inmunidad radiada (cómo soporta el equipo las emisiones de otros equipos) y la inmunidad conducida (como soporta el equipo emisiones de sí mismo).

Para nuestro estudio sólo hemos tenido en cuenta la prueba de emisiones radiadas, pues el equipo no se colocará en un ambiente hostil en cuanto a compatibilidad electromagnética se refiere, ni alimenta a otro equipo que pueda contaminar a través de cables.

Hay 3 clases de detectores que se utilizan normalmente en las mediciones de emisiones RF [14]:

1. Cresta: Responde casi instantáneamente al valor cresta de la señal y vuelve al cero rápidamente. Su rápida respuesta lo hace muy adecuado para realizar pruebas de diagnóstico que requieran rapidez.
2. Media: Mide el valor medio de la señal. Para una señal continua esto será lo mismo que su valor de cresta, pero una señal pulsante tendrá un nivel medio por debajo de su cresta.
3. Cuasi cresta: es un detector de cresta con tiempos de carga y descarga. Las emisiones de tipo impulsivo serán tratadas menos severamente por una medición de cuasi cresta que por una cresta.

Para cualquier medida RF se necesita un aparato que acople la variable medida en la entrada del instrumento de medida. Las variables que se miden toman una de estas formas:

1. Capo electromagnético radiado.
2. Tensión conducida por cable.
3. Corriente conducida por cable.

Encontramos distintos transductores para poder medir una de las 3 formas comentadas, pero en nuestro caso nos centramos en las antenas. Éstas acoplan el campo al receptor que hace las mediciones. Los límites de intensidad del campo eléctrico vienen especificados en voltios o microvoltios, por un metro a una distancia desde la EUT (Equipment Under Test), mientras que los receptores que hacen las mediciones están calibrados en voltios, con una entrada de $50\ \Omega$.

Hemos realizado la prueba de emisiones radiadas en las instalaciones de PREMIUM PSU, una empresa que diseña y comercializa equipos de potencia. Disponen de una cámara semi anechoica en la que realizan las pruebas de emisiones RF para poder comprobar que los equipos que fabrican cumplen la norma.

En las figuras 54 y 55 podemos ver el equipo dentro de la cámara semi anechoica de PREMIUM PSU para la realización del test que hemos llevado a cabo.

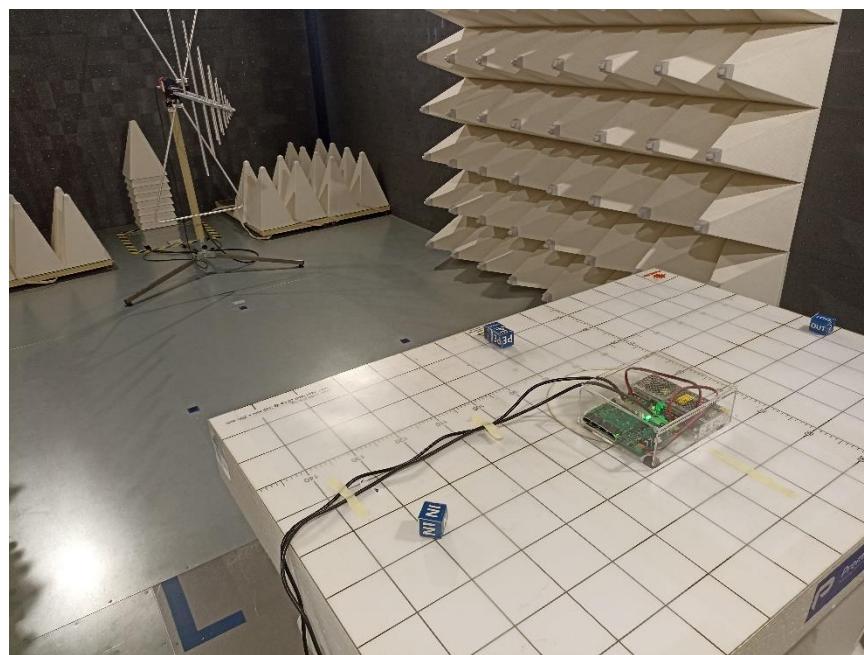


Figura 54. EUT dentro de la cámara semi anecoica.

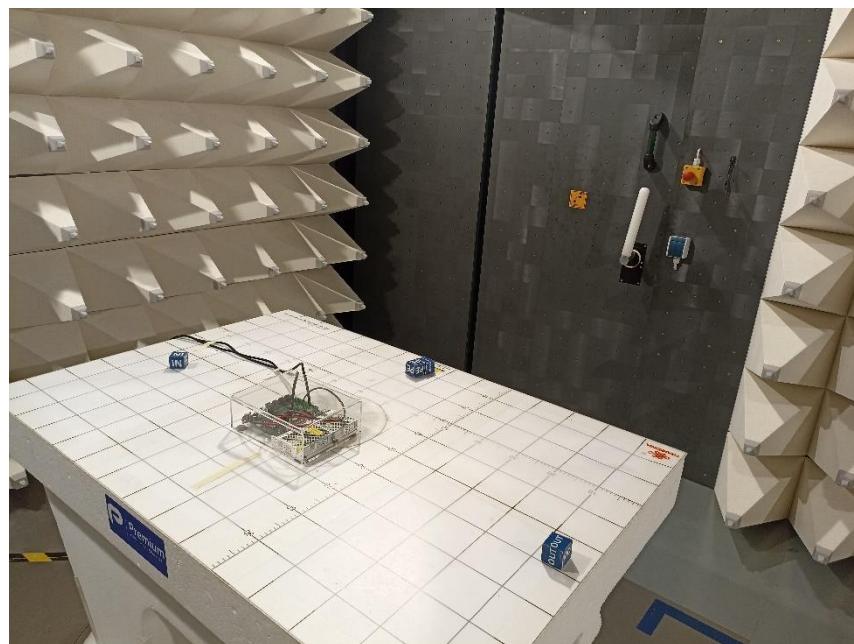


Figura 55. EUT dentro de la cámara semi anecoica.

11.5. Código C, Python y Arduino

Por cuestión de espacio, los proyectos se encuentran adjuntos a esta memoria.

11.6. Diagrama de flujo de la función principal del microcontrolador

Encontramos la imagen adjunta a la memoria, pues es significativamente grande y no podríamos apreciar bien su contenido si se incorpora en esta página.

11.7. Guía de usuario

El documento se adjunta a esta memoria.

11.8. Lista de material

El documento se adjunta a la memoria.