



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Control digital de la gestión de energía de un sistema  
híbrido pila de combustible-batería

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Cobelas Engel, Camilo Luca

Tutor/a: Sánchez Díaz, Carlos

Cotutor/a: Rocha Gaso, María Isabel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## Resumen:

Aproximadamente el 25% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> son generadas por motores de combustión utilizados en el transporte de personas y mercancías. Dado que los combustibles fósiles tienen una disponibilidad limitada, es inevitable que surjan nuevas tecnologías para alimentar la movilidad. Sin embargo, los sistemas exclusivamente eléctricos enfrentan desafíos significativos, como la necesidad de baterías de gran tamaño y alto impacto ambiental.

En este contexto, los sistemas híbridos, que combinan varias tecnologías, se perfilan como la solución más prometedora. Estos sistemas permiten maximizar las ventajas de cada tecnología individual, optimizando el rendimiento y la eficiencia. El campo de los sistemas híbridos está en constante desarrollo y tiene un futuro prometedor debido a su capacidad para integrar y mejorar diferentes fuentes de energía. Además, los drones están revolucionando diversos sectores, destacándose como un área de investigación en pleno auge. La implementación de sistemas de alimentación híbridos en drones esta llamada a impulsar estas tecnologías.

El presente trabajo de fin de grado (TFG) está en el marco de un proyecto de investigación. Este proyecto está centrado en la implementación de un sistema híbrido compuesto por una batería electroquímica y una pila de combustible alimentada con hidrógeno. El sistema está pensado para otorgar la energía necesaria al sistema de propulsión de un dron, otorgándole mayor autonomía y capacidad de carga frente a otros sistemas convencionales.

Al fusionar ambos sistemas de alimentación, surge la necesidad de diseñar un sistema de control digital que gobierne el funcionamiento del sistema híbrido. De un lado debe controlar el balance de planta de la pila de combustible y por otro debe actuar sobre la etapa de potencia que recarga la batería en vuelo. En el actual TFG se hace una contextualización del proyecto, se identifican las necesidades de hardware y software, se seleccionan los componentes que formaran el hardware y se diseña la arquitectura del software. Para realizar estos pasos, se modela el comportamiento del sistema con la definición de una máquina de estados finitos.

La creación de un control digital como el propuesto por el equipo de investigación H2Drone conlleva la necesidad de desarrollar herramientas que permitan el análisis del comportamiento del sistema híbrido. Se ha desarrollado y validado un sistema de adquisición de señales que permite observar el comportamiento del sistema en tiempo real en un ordenador portátil.



## Summary:

Approximately 25% of global CO<sub>2</sub> emissions are generated by combustion engines used in the transportation of people and goods. Given that fossil fuels have limited availability, the emergence of new technologies to power mobility is inevitable. However, exclusively electric systems face significant challenges, such as the need for large batteries with high environmental impact.

In this context, hybrid systems, which combine various technologies, appear to be the most promising solution. These systems allow for maximizing the advantages of each individual technology, optimizing performance and efficiency. The field of hybrid systems is constantly evolving and has a promising future due to its capacity to integrate and enhance different energy sources. Additionally, drones are revolutionizing various sectors, standing out as a booming area of research. The implementation of hybrid power systems in drones is expected to drive these technologies forward.

This bachelor's thesis (TFG) is part of a research project focused on implementing a hybrid system composed of an electrochemical battery and a hydrogen-powered fuel cell. The system is designed to provide the necessary energy to a drone's propulsion system, granting it greater autonomy and load capacity compared to other conventional systems.

By merging both power systems, there arises a need to design a digital control system that governs the operation of the hybrid system. On one hand, it must control the fuel cell's balance of plant, and on the other, it must manage the power stage that recharges the battery in flight. This TFG contextualizes the project, identifies the hardware and software needs, selects the components that will form the hardware, and designs the software architecture. To achieve these steps, the system's behavior is modeled with the definition of a finite state machine.

The creation of a digital control system as proposed by the H2Drone research team requires the development of tools that allow for the analysis of the hybrid system's behavior. A signal acquisition system has been developed and validated, enabling real-time observation of the system's behavior on a laptop.



## Resum:

Aproximadament el 25% de les emissions globals de CO<sub>2</sub> són generades per motors de combustió utilitzats en el transport de persones i mercaderies. Atés que els combustibles fòssils tenen una disponibilitat limitada, és inevitable que sorgisquen noves tecnologies per a alimentar la mobilitat. No obstant això, els sistemes exclusivament elèctrics enfronten desafiaments significatius, com la necessitat de bateries de gran tamany i alt impacte ambiental.

En aquest context, els sistemes híbrids, que combinen diverses tecnologies, es perfilen com la solució més prometedora. Aquests sistemes permeten maximitzar els avantatges de cada tecnologia individual, optimitzant el rendiment i l'eficiència. El camp dels sistemes híbrids està en constant desenvolupament i té un futur prometedor a causa de la seua capacitat per a integrar i millorar diferents fonts d'energia. A més, els drons estan revolucionant diversos sectors, destacant-se com una àrea d'investigació en ple auge. La implementació de sistemes d'alimentació híbrids en drons està cridada a impulsar aquestes tecnologies.

El present treball de fi de grau (TFG) està en el marc d'un projecte d'investigació. Aquest projecte està centrat en la implementació d'un sistema híbrid compost per una bateria electroquímica i una pila de combustible alimentada amb hidrogen. El sistema està pensat per a atorgar l'energia necessària al sistema de propulsió d'un dron, atorgant-li major autonomia i capacitat de càrrega enfront d'altres sistemes convencionals.

En fusionar ambdós sistemes d'alimentació, sorgix la necessitat de dissenyar un sistema de control digital que governe el funcionament del sistema híbrid. D'una banda ha de controlar el balanç de planta de la pila de combustible i d'altra banda ha d'actuar sobre l'etapa de potència que recarrega la bateria en vol. En l'actual TFG es fa una contextualització del projecte, s'identifiquen les necessitats de hardware i software, es seleccionen els components que formaran el hardware i es dissenya l'arquitectura del software. Per a realitzar aquests passos, es modela el comportament del sistema amb la definició d'una màquina d'estats finits.

La creació d'un control digital com el proposat per l'equip d'investigació H2Drone comporta la necessitat de desenvolupar eines que permeten l'anàlisi del comportament del sistema híbrid. S'ha desenvolupat i validat un sistema d'adquisició de senyals que permet observar el comportament del sistema en temps real en un ordinador portàtil.



# ÍNDICE DE LA MEMORIA

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1 OBJETIVOS DEL TFG.....	9
1.2 ORGANIZACIÓN Y DESARROLLO DEL TFG .....	10
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS o DRONES .....	10
2.2 LAS BATERÍAS DE LITIO POLÍMERO .....	13
2.3 EL HIDRÓGENO.....	14
2.4 INTRODUCCIÓN A LAS PEMFC .....	17
2.5 MICROCONTROLADORES Y TARJETAS DE DESARROLLO .....	18
2.6 MAQUINAS DE ESTADOS FINITOS .....	19
<b>CAPÍTULO 3. EL SISTEMA: SISTEMA HÍBRIDO PILA DE COMBUSTIBLE-BATERÍA.....</b>	<b>20</b>
3.1 COMPONENTES.....	23
3.2 LOS SENSORES.....	25
3.3 LOS ACTUADORES .....	26
<b>CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN .....</b>	<b>28</b>
4.1 NECESIDADES DEL PROBLEMA .....	28
4.2 ELECCIÓN DE COMPONENTES .....	28
<b>CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL HARDWARE .....</b>	<b>33</b>
5.1 ACONDICIONAMIENTO DE LAS ENTRADAS AL SISTEMA.....	33
5.2 SEÑALES DE CONTROL.....	41
<b>CAPÍTULO 6. DISEÑO DEL SOFTWARE .....</b>	<b>45</b>
6.1 LECTURA DE LAS SEÑALES DE ENTRADA.....	46
6.2 PROMEDIADO DE LA CORRIENTE DE CONSUMO DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN .....	47
6.3 DISEÑO DE LAS MÁQUINAS DE ESTADOS .....	47
<b>CAPÍTULO 7. TESTEO DE LOS SUBSISTEMAS DEL SISTEMA DE CONTROL DIGITAL.....</b>	<b>52</b>
7.1 DIVISORES DE TENSIÓN PARA LA PEMFC Y LA BATERÍA.....	52
7.2 ACONDICIONAMIENTO SENSORES DE CORRIENTE .....	53
7.3 ACONDICIONAMIENTO SENSORES DE TEMPERATURA .....	55
7.4 ETAPAS DE POTENCIA MOSFET Y CONVERTIDOR BUCK .....	56
<b>CAPÍTULO 8. GRAFICADO EN TIEMPO REAL DE LAS SEÑALES DEL SISTEMA.....</b>	<b>57</b>
8.1 PYTHON COMO HERRAMIENTA DE PLOT .....	57
8.2 RESULTADOS DEL GRAFICADO EN TIEMPO REAL.....	58
<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>59</b>



## LISTADO DE ABREVIATURAS

TFG: Trabajo Fin de Grado  
PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell  
DC: Corriente continua  
PWM: Pulse Width Modulation  
PC: Personal computer  
USB: Universal Serial Bus  
ADC: Analog to Digital Converter  
DAC: Digital to Analog Converter  
SPI: Serial Protocol Interface  
UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter  
CMOS: Complementary Mosfet  
CI: Circuito Integrado  
MOS: Mosfet  
AO: Amplificador operacional  
AOI: Amplificador operacional de instrumentación  
AFC: Alkaline Fuel Cells  
PAFC: Phosphate Fuel Cells  
MCFC: Molten Carbonate Fuel Cells  
SOFC: Solid Oxide Fuel Cells  
LED: Light Emitter Diode  
MUX: Multiplexor

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. UAS EHang 2176-S en pruebas de vuelo. _____	11
Figura 2. Densidad energética de según el tipo de almacenamiento de energía eléctrica [2]. _____	13
Figura 3. Batería G-Tech 44.4 V 5500 mAh 12S1P. _____	14
Figura 4. Clasificación del hidrógeno por colores según su fuente, materia prima y proceso de extracción [9]. _____	15
Figura 5. Izquierda: Célula de combustible de Groove. Derecha: Célula de combustible fabricada por Honda en la actualidad. _____	16
Figura 6. Estructura general de una PEMFC [11] _____	18
Figura 7. Arduino, Raspberri Pi y ESP32. _____	19
Figura 8. Esquema conceptual del sistema híbrido pila de combustible-batería en un dron.[1] _____	21
Figura 9. Demanda de potencia de un dron DJI – Matrice 300 RTK en vuelo con una carga de 6.3 kg [1].23	
Figura 10. Vistas de la H100, PEMFC que forma parte del sistema híbrido. _____	25
Figura 11. Válvula principal de entrada del combustible a la PEMFC. _____	27
Figura 12. Ventilador de 12 V de la PEMFC. _____	27
Figura 13. Esquema del graficado de los datos en tiempo real. _____	28
Figura 14. Sensor de temperatura LMT85. _____	30
Figura 15. Pinout y aplicación típica para la medida de corriente [16]. _____	30
Figura 16. Placa de circuito impreso con el ACS712 integrado. _____	31
Figura 17. Interfaz de la herramienta online WEBENCH de Texas Instruments. _____	32
Figura 18. Placa de desarrollo fabricada por SparkFun para la comunicación entre el microcontrolador y el PC. _____	33
Figura 19. Conexión de los multiplexores con las señales y el ADC _____	35
Figura 20. Esquema general de acondicionamiento de los voltajes. _____	36
Figura 21. Gráfica de conversión de corriente a tensión del ACS712 [23] _____	37
Figura 22. Representación de la evolución de la señal del ACS712 y rango del ADC _____	38
Figura 23. Diagrama de bloques para la señal de los sensores de corriente _____	39
Figura 24. Izquierda: Respuesta temporal del sensor LMT85 frente a un termistor. Derecha: Función de conversión de temperatura a voltaje para el sensor LMT85 [14]. _____	40
Figura 25. Diagrama de bloques de los sensores de temperatura del sistema híbrido. _____	40
Figura 26. Esquemático del multiplexor 2:1 [25]. _____	41
Figura 27. Distribución de pines del MCP4921. _____	42
Figura 28. Bits de ajuste del MCP4921[19]. _____	43
Figura 29. Diagrama de bloques para el control de la corriente entregada por el convertidor boost ____	43
Figura 30. Representación gráfica de una válvula solenoide normalmente cerrada de dos vías. [26]____	44
Figura 31. Etapa de potencia para el ventilador con control PWM. _____	45
Figura 32. Ilustración de la conversión secuencial de los 16 canales del ADC _____	46
Figura 33. Representación gráfica para un buffer circular. _____	47



<i>Figura 34. Izquierda: Montaje circuito acondicionamiento celdas LiPo y PEMFC. Derecha: Detalle del divisor de tensión y el filtro RC paso-bajo.</i>	52
<i>Figura 35. Medición de salida para voltaje nominal en la etapa de acondicionamiento para la celda 6 de la batería LiPo</i>	53
<i>Figura 36. Voltajes en el sistema digital para los valores de celda (Celda 6 LiPo-9 máximo y mínimo.</i>	53
<i>Figura 37. Montaje etapa acondicionamiento para el sensor ACS712.</i>	54
<i>Figura 38. Medición del offset de la señal de la etapa de medida de corriente y comprobación de la linealidad de la salida.</i>	55
<i>Figura 39. Acondicionamiento de los dos LMT85 formado por filtro paso bajo, buffers y multiplexor.</i>	56
<i>Figura 40. Montaje circuito de control PWM para el ventilador.</i>	56
<i>Figura 41. Montaje y validación para el regulador de voltaje conmutado.</i>	57
<i>Figura 42. Gráficas generadas en Python para dos sensores de corriente y uno de temperatura.</i>	58
<i>Figura 43. Gráficas corriente y temperatura con Python en tiempo real.</i>	59





## LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tipos de drones según su alimentación.</i>	12
<i>Tabla 2. Comparativa entre distintas células de combustible.</i>	17
<i>Tabla 3: Características batería G-Tech 5000mAh 60/120C 44.4V 12S1P</i>	24
<i>Tabla 4. Características técnicas de la célula de combustible H100 de Horizon Technologies</i>	24
<i>Tabla 5. Entradas al sistema de control digital</i>	34
<i>Tabla 6. Valores extremos de la salida del LMT85</i>	39
<i>Tabla 7. Señales de control del sistema híbrido</i>	42
<i>Tabla 8. Estados, eventos y transiciones para la MEF que gobierna el convertidor DC/DC</i>	49
<i>Tabla 9. Estados, eventos y transiciones para la MEF que gobierna el ventilador</i>	50
<i>Tabla 10. Estados, eventos y transiciones para la MEF que gobierna la PEMFC.</i>	52

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fin de grado (TFG), está en el marco de investigación de H2Drone. H2Drone es un equipo de investigación formado por varios investigadores pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Sus dos figuras principales son Carlos Sánchez Díaz y Abel García Bernabé. El ámbito de conocimiento de Carlos se centra en la electrónica de potencia mientras que el de Abel es la química y la termodinámica.

En el presente, el objetivo del equipo es diseñar un sistema de energía híbrido para un dron. Consiste en fusionar dos sistemas de almacenamiento de energía, una celda de combustible y una batería LiPo para sustentar el vuelo de un dron [1]. El motivo de implementar este sistema híbrido es aumentar considerablemente el tiempo de vuelo del dron, alargándolo a horas. Al incorporar dos sistemas de energía el peso y el tamaño del dron aumentan considerablemente. De esta manera, se pretende diseñar un sistema para la vigilancia o transporte. Situaciones en las que el aumento de rango de vuelo aporte un gran avance.

Es un proyecto multidisciplinar ya que requiere personas especializadas en distintos campos de conocimiento para poder llevarlo a cabo. Por una parte, se está investigando sobre el desarrollo de las membranas que forman las celdas de combustible, de manera que sea posible fabricar celdas propias en un futuro.

Sin embargo, el presente TFG se centra en diseñar y validar un sistema de control digital que adquiera y procese las señales que gobiernan el sistema. Analizando la naturaleza de las señales, estudiando los comportamientos del sistema y diseñando un control digital robusto.

Para realizar esta tarea se pretende implementar una adquisición, procesado y control mediante un sistema embebido formado por un microprocesador y circuitos de hardware.

### 1.1 OBJETIVOS DEL TFG

El principal objetivo de este trabajo de fin de grado es desarrollar un sistema de control digital para un sistema híbrido pila de combustible-batería. Ha de ser capaz de adquirir e interpretar correctamente un conjunto de señales analógicas y generar señales de control que gobiernen el sistema. Se diseña también el acondicionamiento y procesamiento analógico de las señales para adaptarla a los requisitos de entrada del microcontrolador en el que se implementa dicho sistema de control.

El objetivo principal se divide en una serie de objetivos específicos, los cuales serán cubiertos a lo largo de los capítulos que componen el TFG. Dichos objetivos son los siguientes:

*1.1.1 Introducir los temas principales que engloban el área de trabajo del proyecto. Revisión bibliográfica de los vehículos aéreos no tripulados conocidos como drones, el hidrógeno como combustible, las celdas de combustible y los elementos de un control digital.*

*1.1.2 Presentar el esquema del sistema híbrido pila de combustible-batería. Se hace una descripción del sistema a controlar, identificando todos los elementos del sistema*

*1.1.3 Justificar la elección de la arquitectura del sistema para el control digital. Diseño de la arquitectura y elección de componentes.*

*1.1.4 Diseñar la máquina de estados que gobierna las señales del sistema. Introducción a las máquinas de estados finitos y sus ventajas. Presentación de las entradas y salidas del sistema.*



1.1.5 *Explicar los distintos bloques de la tarjeta de desarrollo y periféricos a emplear. Elección de periféricos, componentes, entradas y salidas de la tarjeta de desarrollo.*

1.1.6 *Caracterizar y acondicionar las señales del sistema. Las señales del sistema tienen diversos rangos y magnitudes que han de ser adaptadas a las entradas del sistema de procesado digital.*

1.1.7 *Implementar el software para la máquina de estados finitos y la adquisición de las señales. Programar el software de la tarjeta de desarrollo en el entorno STM32CubeIDE.*

1.1.8 *Entender el comportamiento de un sistema híbrido. Obteniendo gráficas y datos en tiempo real que permitan comprender el funcionamiento para posteriores implementaciones.*

1.1.9 *Simular el sistema y testear los distintos eventos. Definir si el sistema es capaz de procesar las señales y generar señales de control según la definición previamente hecha.*

## 1.2 ORGANIZACIÓN Y DESARROLLO DEL TFG

El contenido del TFG se ha estructurado en una serie de capítulos que se describen a continuación.

- En el capítulo 1 se desglosa el objetivo principal en objetivos secundarios y se presenta la estructura por capítulos que sigue la memoria.
- En el capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica de información relevante para entender el contexto de aplicación del proyecto.
- En el capítulo 3 se describe exhaustivamente el funcionamiento del sistema y se analizan detalladamente los componentes de este.
- En el capítulo 4 se definen los requerimientos del sistema para este control digital. Se eligen los componentes para cumplir con dichos requerimientos.
- En el capítulo 5 se diseñan los circuitos electrónicos que intervienen en el procesado de las señales y en el control de los actuadores del sistema.
- En el capítulo 6 se diseña la arquitectura del software de control basado en una máquina de estados.
- En el capítulo 7 se valida el hardware y software diseñado para la solución.
- En el capítulo 8 se presenta la herramienta para el graficado y visualización de las señales que gobiernan el sistema en tiempo real.

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS o DRONES

#### 2.1.1 DEFINICIÓN DE DRON

Un dron, o vehículo aéreo no tripulado (UAS, Unmanned Aerial System), es una aeronave que opera sin un piloto a bordo. Estos dispositivos pueden ser controlados de manera remota por

un operador humano o, en algunos casos, poseen un sistema de control de vuelo independiente. Normalmente están formados por un cuerpo que contiene el sistema de vuelo, batería y cámara para la monitorización. Este cuerpo posee un número de brazos que incorporan rotores encargados de la sustentación de la aeronave. La variación entre las velocidades de dichos rotores permite maniobrar al dispositivo. Los drones se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones que van desde la recreación hasta el uso militar, científico y comercial.

### 2.1.2 HISTORIA DEL DRON

El dron, como gran parte de la tecnología moderna, inicia su desarrollo en el ámbito militar. Durante la primera guerra mundial (1914) surge la necesidad de diseñar blancos aéreos para los pilotos y aumenta el riesgo de las misiones de reconocimiento. Es en este momento cuando se diseñan los primeros drones. A lo largo del siglo XX se continuaron desarrollando este tipo de aeronaves controladas de manera remota. Durante la guerra fría (1947 - 1991), tecnologías emergentes como la aparición del GPS (1987) impulsaron el uso y desarrollo de los drones en el espionaje y la vigilancia.

A finales del siglo XX y principios del XXI, con el avance de la tecnología, los drones comenzaron a incorporar sistemas de vuelo autónomo, motores eléctricos eficientes y cámaras de alta resolución. Esta evolución permitió que su uso se expandiera más allá del ámbito militar, incluyendo aplicaciones civiles y comerciales como la fotografía aérea, la agricultura de precisión, la entrega de paquetes y el monitoreo ambiental.

### 2.1.3 LOS DRONES EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad, en plena transformación tecnológica, el desarrollo e innovación en el ámbito de los drones evoluciona a un ritmo vertiginoso. Sus usos y aplicaciones se han extendido a todos los ámbitos. En 2023 la empresa china EHang Holding Limited anunció que su modelo de dron EH2176-S había obtenido por primera vez en la historia el certificado de tipo TC. Este certificado demuestra que la aeronave cumple con los estándares de seguridad y además que está calificado y listo para operar las operaciones comerciales.



Figura 1. UAS EHang 2176-S en pruebas de vuelo.

Lo más sorprendente es que el EH2176-S de la Figura 1 está diseñado para el transporte de personas, abriendo nuevos horizontes hacia el futuro de la movilidad aérea urbana. Numerosas pruebas en entornos controlados han resultado exitosas, validando su integridad ante incendios o choques.

El uso de estos dispositivos también se ha extendido en el rodaje de obras audiovisuales, retransmisiones deportivas, anuncios de televisión, entre otros. Al incorporar una cámara profesional integrada en su estructura, los drones son capaces de realizar transiciones que podrían

parecer imposibles hace unos años o filmar desde sitios impensables. Hay muchas más aplicaciones en las que el dron destaca frente a otras tecnologías, algunos ejemplos pueden ser:

- *Desastres naturales.* En situaciones de emergencia como los incendios, los drones incorporan cámaras de visión térmica con las cuales identifican las zonas más afectadas y facilitan las labores de los cuerpos de seguridad del estado. En otros tipos de desastres naturales como inundaciones o terremotos permiten un desplazamiento muy rápido y vista de pájaro para localizar personas atrapadas o en peligro.
- *Espectáculos nocturnos.* Los drones también ofrecen alternativas sostenibles en cuanto al ocio y el espectáculo. Por ejemplo, se utilizan drones con luces LED incorporadas para realizar espectáculos aéreos nocturnos simulando el efecto de los fuegos artificiales, llegando a lograr figuras mucho más impresionantes. Además, el uso de este tipo de drones no crea ningún tipo de residuo en el ambiente.
- *Transporte de medicamentos.* La empresa *Zipline* ofrece un servicio de transporte de mercancía y medicamentos de manera aérea y sin emisiones a la atmósfera.

En resumen, los drones son capaces de realizar diversas tareas de una forma más eficiente, sostenible y fácil que otro tipo de tecnologías. Sin embargo, el uso de estos dispositivos es peligroso ya que es necesaria una comunicación y regulación en el espacio aéreo. Tecnologías como el 5G o el GPS están impulsando el uso de estos sistemas que forman poco a poco parte de la vida del ser humano.

#### 2.1.4 TIPOS DE DRONES SEGÚN EL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Existen muchos tipos de drones que se pueden clasificar por el tamaño, número de rotores, propósito, etc. Se van a estudiar los tipos de dron según la alimentación de estos con el objetivo de comparar la tecnología de hidrógeno incorporada en el sistema objeto de este TFG con otras soluciones posibles que se observan en la Tabla 1.

El sistema de alimentación de un dron es lo que mantiene los rotores en funcionamiento y por tanto sustenta la aeronave para que cumpla su función. El tipo de sistema de alimentación está directamente relacionado con las capacidades y autonomía del UAS.

Tipo de Alimentación	Ventajas	Desventajas
<b>Baterías Recargables</b>	- Ligeras - Buena relación peso-capacidad energética	- Tiempo de vuelo limitado
<b>Celdas de Combustible</b>	- Alta densidad energética - Mayor autonomía	- Tecnología más costosa - Mayor complejidad de manejo
<b>Motores de Combustión Interna</b>	- Mayor potencia - Vuelos prolongados	- Más ruidosos - Mayor emisión de gases contaminantes
<b>Energía Solar</b>	- Extiende el tiempo de vuelo - Energía renovable	- Dependencia de las condiciones meteorológicas - Eficiencia limitada de los paneles solares

Tabla 1. Tipos de drones según su alimentación.

De acuerdo con investigaciones recientes, los drones con baterías LiPo son los más comunes especialmente en configuraciones de varios rotores. Con características como bajo mantenimiento, facilidad de uso o emisiones cero ocupan más del 80% del mercado, dejando con menos del 20% a drones con sistemas de combustión o sistemas híbridos [2].

El principal objetivo para los UAS destinados al rescate, vigilancia y transporte es aumentar la autonomía de vuelo. Introducir sistemas como las células de combustible con una densidad de energía mayor a la de las baterías permite aumentar considerablemente la autonomía añadiendo complejidad al sistema sin aumentar excesivamente el peso. De esta manera se exploran soluciones que respetan el medio ambiente y no emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera.

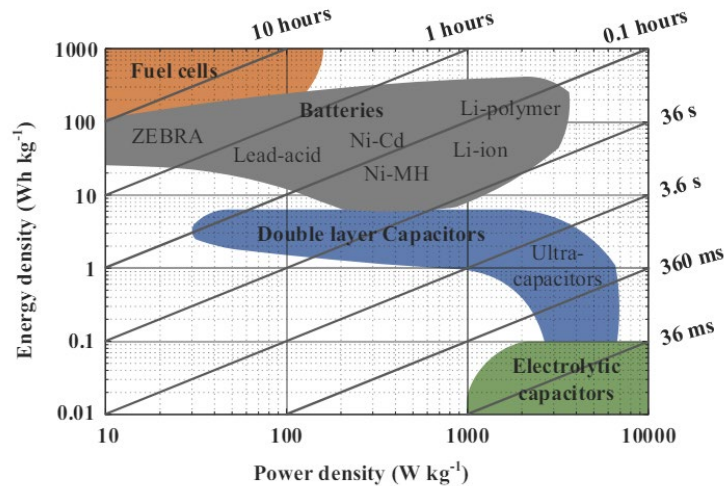


Figura 2. Densidad energética de según el tipo de almacenamiento de energía eléctrica [2].

Como se observa en la Figura 2, las células de combustible ocupan el puesto de mayor densidad energética. Sin embargo, la entrega de potencia es menor que la de otros sistemas. Además, como se indica en [3], la demanda de alta densidad de potencia a las celdas de combustible como la PEMFC puede ocasionar daños en su estructura interna y debilitar los materiales que la componen.

## 2.2 LAS BATERÍAS DE LITIO POLÍMERO

Las baterías de litio-polímero (LiPo) representan una evolución significativa en la tecnología de almacenamiento de energía, siendo ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones modernas debido a su alta densidad energética, peso reducido y flexibilidad en el diseño. Estas baterías, derivadas de la tecnología de iones de litio, emplean un electrolito de polímero en lugar de un electrolito líquido, lo que les confiere ventajas notables en términos de seguridad y forma.

El desarrollo de las baterías LiPo ha sido impulsado por la necesidad de soluciones energéticas compactas y eficientes para dispositivos electrónicos portátiles, vehículos eléctricos, y sistemas de energía renovable. Según [4] las LiPo ofrecen una densidad de energía superior en comparación con las baterías de níquel-cadmio (NiCd) y níquel-hidruro metálico (NiMH), lo que las convierte en la mejor elección para este sistema.

Además, su capacidad de ser moldeadas en diversas formas y tamaños proporciona una ventaja significativa en la integración en productos de diseño compacto, como los smartphones y drones.





Figura 3. Batería G-Tech 44.4 V 5500 mAh 12S1P.

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, las baterías LiPo también presentan desafíos, particularmente en cuanto a la estabilidad térmica y la seguridad. El estudio [5] menciona que la composición química de las LiPo las hace susceptibles a la inflamación y explosión si no se manejan correctamente, requiriendo sistemas avanzados de gestión de batería para monitorear y controlar su funcionamiento.

Las celdas de las baterías LiPo pueden desequilibrarse con el tiempo debido a diferencias en la capacidad y resistencia interna de cada celda. Este desequilibrio ocurre cuando una o más celdas se cargan o descargan a un ritmo diferente al de las demás. Cuando las celdas están desequilibradas, algunas pueden sobrecargarse mientras que otras no se cargan completamente, lo que incrementa el riesgo de sobrecalentamiento y conduce a la degradación acelerada de las celdas. Por ello, es crucial contar con sistemas de balanceo de celdas dentro del sistema de gestión de carga para asegurar que todas las celdas mantengan niveles de voltaje similares, mitigando los riesgos asociados al desequilibrio.

## 2.3 EL HIDRÓGENO

El hidrógeno posee el número atómico 1 en la tabla periódica de los elementos, haciéndolo el más simple y ligero. Además, es el elemento más abundante del universo, ocupando un 75% de la masa de este. Lo que lo hace muy atractivo hacia las nuevas tecnologías de combustible es su abundancia en el planeta tierra, está presente en el agua (H<sub>2</sub>O) cubriendo el 71% de la superficie terrestre [6]. Si se consigue economizar la extracción de hidrógeno, se convertirá en el combustible del futuro, reduciendo drásticamente las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

### 2.3.1 LA EXTRACCIÓN

El hidrógeno no se encuentra en estado puro en la naturaleza, debe ser extraído de compuestos que lo contienen. El hidrógeno se puede extraer de varias formas, entre ellas las más extendidas son:

- *Reformado del gas natural.* Actualmente es el método más común para la producción de hidrógeno de forma industrial. Involucra la reacción de metano con vapor a altas temperaturas produciendo hidrógeno y CO<sub>2</sub>. Es una alternativa que emite muchos gases nocivos a la atmósfera por lo que no es sostenible a largo plazo [7].
- *Electrólisis del agua.* La electrólisis implica la descomposición del agua (H<sub>2</sub>O) en hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) mediante el uso de electricidad. Este método es considerado una vía sostenible si la electricidad utilizada proviene de fuentes renovables. Existen varios tipos de electrólisis, incluyendo la electrólisis alcalina, de membrana de intercambio de protones y de óxido sólido [8].

Con la vista en el futuro, se están desarrollando alternativas a la producción de hidrógeno que no impliquen la liberación de emisiones a la atmósfera. Tecnologías con la pirólisis del metano, la

gasificación de biomasa o la fotosíntesis artificial están aún en etapas tempranas de desarrollo, pero presentan una opciones prometedoras para la producción de hidrógeno.

Para diferenciar los distintos tipos de producción de hidrógeno se tiene en cuenta el combustible o fuente de energía para la extracción y la forma de la extracción, de tal manera que se obtienen los siguientes tipos clasificados por colores como se ve en la Figura 4.



Figura 4. Clasificación del hidrógeno por colores según su fuente, materia prima y proceso de extracción [9].

### 2.3.2 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

El hidrógeno puede ser utilizado en la movilidad a través de dos enfoques principales: los motores de combustión de hidrógeno y las celdas de combustible. Ambos métodos presentan ventajas y desafíos únicos. Sin embargo, su desarrollo está siendo impulsado por significativos avances tecnológicos y comerciales.

#### 2.3.2.1 LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El motor de combustión de hidrógeno funciona de manera similar a los motores de combustión interna tradicionales, pero utiliza hidrógeno como combustible en lugar de gasolina o diésel, combinándolo con oxígeno para producir energía. El subproducto principal de esta combustión es el vapor de agua, lo que lo hace significativamente más limpio en términos de emisiones de carbono. Esta reacción emite un 99% menos de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que un motor diésel convencional. El estudio [10] destaca que los motores de combustión de hidrógeno tienen la ventaja de poder adaptarse a la infraestructura existente de motores de combustión interna con modificaciones relativamente menores.

Sin embargo, enfrentan desafíos como la producción de NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) debido a las altas temperaturas de combustión y la presencia de nitrógeno en el aire. Los óxidos de nitrógeno son muy nocivos, obligando a implementar sistemas adicionales de control de emisiones. Otro desafío es manejar las altas temperaturas generadas por la combustión del hidrógeno, creando la necesidad de diseñar sistemas de refrigeración más eficientes.

Existen prototipos ya fabricados y que han sido probados con un motor de combustión de hidrógeno por grandes marcas. Algunos de estos ejemplos son el BMW Hydrogen 7 o el Toyota Corolla Cross.

#### 2.3.2.2 LAS CÉLULAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO



Las células de combustible de hidrógeno son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno y el oxígeno en electricidad, calor y agua mediante un proceso de oxidación-reducción. Este método de generación de energía es limpio y eficiente, lo que lo convierte en una opción prometedora para diversas aplicaciones, desde la alimentación de vehículos hasta la generación de energía estacionaria.

El concepto de células de combustible se remonta a principios del siglo XIX cuando Sir William Grove desarrolló la primera célula de combustible en 1839 de la Figura 5. Sin embargo, el desarrollo práctico y la aplicación de esta tecnología no se materializó hasta el siglo XX, principalmente debido a los avances en la ciencia de materiales y la necesidad creciente de fuentes de energía más limpias.

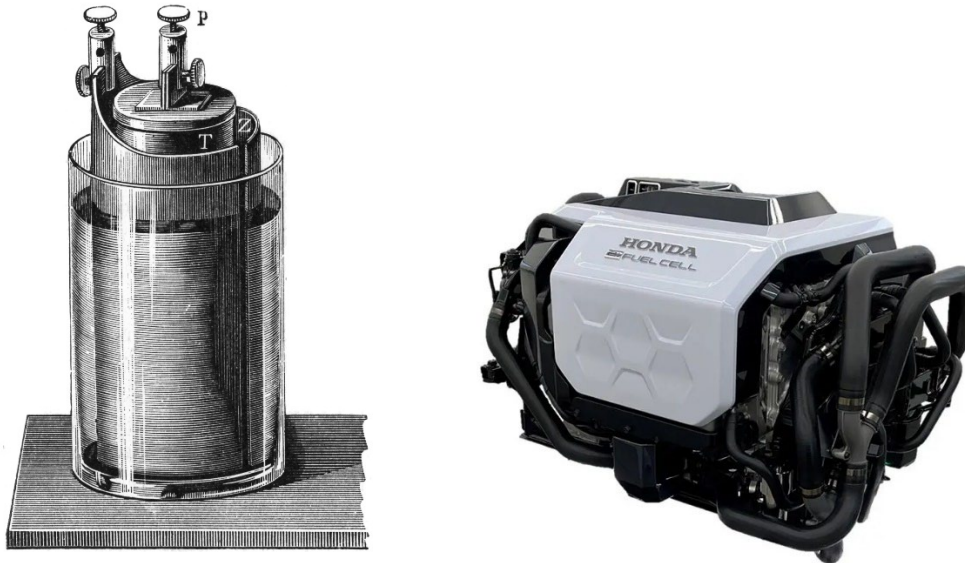


Figura 5. Izquierda: Célula de combustible de Grove. Derecha: Célula de combustible fabricada por Honda en la actualidad.

El funcionamiento de una célula de combustible de hidrógeno se basa en la reacción electroquímica entre el hidrógeno ( $H_2$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ). La estructura básica de una célula de combustible incluye los siguientes componentes:

- **Ánodo.** El hidrógeno se suministra al ánodo, donde se disocia en protones ( $H^+$ ) y electrones ( $e^-$ ).
- **Electrolito.** Los protones atraviesan el electrolito hacia el cátodo. Este componente es crucial para el transporte selectivo de iones.
- **Cátodo.** El oxígeno se suministra al cátodo, donde reacciona con los protones que han atravesado el electrolito y los electrones que han viajado a través de un circuito externo, formando agua ( $H_2O$ ).

La reacción química ocurrida se representa según la expresión (1). Además del agua ( $H_2O$ ) la reacción genera calor y electricidad como productos.



Existen varios tipos de células de combustible, diferenciados principalmente según el tipo de electrolito que utilizan:

- **Célula de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC).** Utiliza ácido fosfórico como electrolito. Es adecuada para aplicaciones estacionarias debido a su capacidad de operación a altas temperaturas.

- *Célula de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)*. Emplea una mezcla de carbonatos fundidos como electrolito. Es adecuada para aplicaciones de gran escala como plantas de energía debido a su alta eficiencia y capacidad para utilizar varios combustibles.
- *Célula de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)*. Utiliza óxidos sólidos como electrolito. Funciona a temperaturas muy altas, lo que la hace ideal para aplicaciones industriales.
- *Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)*. Utiliza una membrana de polímero como electrolito. Son conocidas por su alta eficiencia y rápida respuesta a la demanda de energía.

Tipo	Eficiencia	Potencia	Temperatura de trabajo (°C)	Ciclos de vida
PAFC	40%	1–100 kW	160–220	>500 veces
MCFC	45–50%	100–400 kW	620–660	5000–20,000 h
SOFC	60%	300 kW–3 MW	800–1000	>1000 veces
PEMFC	35–60%	0.1 kW–2 MW	60–80	>500 veces

Tabla 2. Comparativa entre distintas células de combustible.

Los tres primeros tipos de células de combustible de la Tabla 2 están diseñadas para la generación de energía de manera estacionaria. Obtienen el máximo rendimiento a altas temperaturas y generalmente funcionan mejor a gran escala.

Al contrario que las demás, las PEMFC poseen un tiempo de arranque más rápido lo que las hace ideales para sistemas móviles, con una alta capacidad de arranque parada

## 2.4 INTRODUCCIÓN A LAS PEMFC

Una PEMFC individual tiene la estructura de la Figura 6. La estructura general consta de dos placas bipolares (BPs), dos capas de difusión de gas (GDLs), dos capas de catalizador (CLs) y una membrana de intercambio de protones (PEM).

Como indica el estudio [11], una de las placas bipolares distribuye uniformemente el hidrógeno en la placa de difusión de gas del ánodo. Mientras, la otra placa bipolar distribuye el O<sub>2</sub> del aire en la placa de difusión del cátodo. Las BPs también conducen la corriente eléctrica de una celda a otra, disipan el calor y frenan la fuga de los gases.

Las placas de difusión de gas son materiales porosos normalmente hechos de fibras de carbono, conducen el calor y la electricidad y permiten el paso de los reactantes (H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>). Además, protegen la placa de catalizador de la corrosión o erosión, drenando el agua formada en la reacción.

Las capas de catalizador son dos componentes críticos a cada lado de la membrana donde ocurren las reacciones electroquímicas (PEM). La PEM es una membrana semipermeable diseñada para permitir el paso de protones de hidrógeno del ánodo al cátodo mientras evita el paso de los electrones.

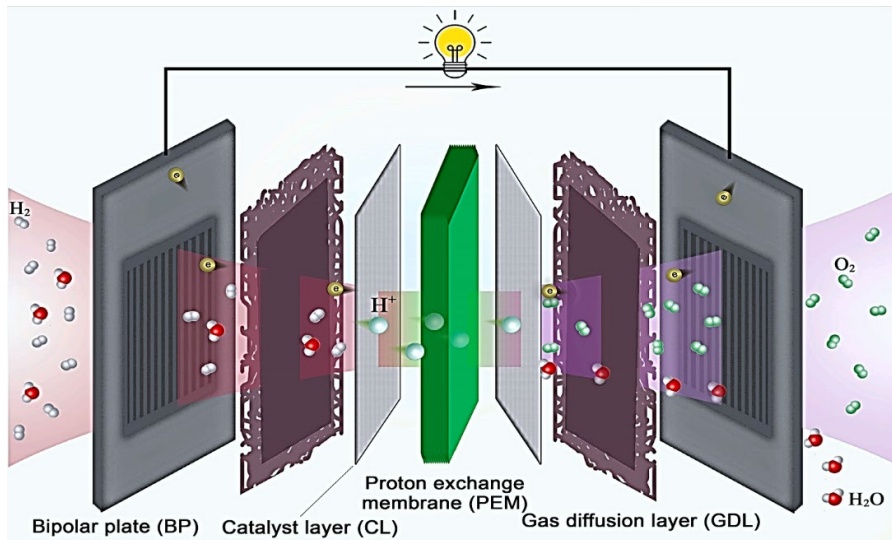


Figura 6. Estructura general de una PEMFC [11]

Dentro de las PEMFC existen distintos tipos, entre ellas se encuentran las de cátodo cerrado y cátodo abierto. Las PEMFC de cátodo cerrado requieren un subsistema de suministro de aire además del subsistema de entrega y circulación de combustible, el subsistema de refrigeración y el controlador de la pila de combustible. En contraste, una PEMFC de cátodo abierto se alimenta directamente con aire ambiente. Ofrece una configuración simplificada donde los sistemas de refrigeración, humidificación y control de presión de entrada pueden eliminarse del sistema. De esta manera, se logra un sistema significativamente menos complejo, facilitando la implementación en sistemas de vehículos aéreos donde el peso y el tamaño son factores clave [12].

Sin embargo, la eliminación de estos subsistemas complejos introduce variaciones en rendimiento de la pila afectadas por las condiciones del entorno, donde la temperatura y la humedad fluctuarán inevitablemente.

En el sistema híbrido objeto de este TFG se sitúa una PEMFC de cátodo abierto. A pesar de la simplificación que ofrece una PEMFC de cátodo abierto, uno de los desafíos inherentes es la acumulación de impurezas en la pila de combustible. Durante el funcionamiento, el aire ambiente que alimenta el cátodo contiene partículas y contaminantes como polvo, polen o aerosoles que se depositan en las placas de catalizador. Estas impurezas pueden obstruir los caminos de reacción y disminuir la eficiencia del proceso electroquímico, afectando negativamente el rendimiento de la pila. Para mitigar este problema, se emplea una válvula de purgado que se abre periódicamente para expulsar las impurezas acumuladas y garantizar que la pila de combustible funcione de manera óptima.

Este mecanismo de purga es crucial para mantener la longevidad y eficiencia del sistema, asegurando que las variaciones en el rendimiento debidas a la contaminación sean minimizadas y que el sistema pueda operar de manera confiable en diferentes condiciones ambientales.

## 2.5 MICROCONTROLADORES Y TARJETAS DE DESARROLLO

En la última década, el auge de la tecnología ha impulsado el desarrollo y la implementación de sistemas embebidos en una amplia gama de aplicaciones, desde electrodomésticos inteligentes hasta dispositivos médicos y automóviles. En el corazón de muchos de estos sistemas se encuentran los microcontroladores, componentes esenciales que proporcionan el control y la funcionalidad necesarios para que estos dispositivos operen de manera eficiente. Junto a ellos, las

tarjetas de desarrollo han emergido como herramientas cruciales para el prototipado y el desarrollo de soluciones basadas en microcontroladores.

Un microcontrolador es un circuito integrado que incluye un procesador, memoria y periféricos de entrada/salida en un solo chip. A diferencia de los microprocesadores utilizados en las computadoras personales, los microcontroladores están diseñados para tareas específicas y son parte integral de los sistemas embebidos, donde su eficiencia energética y capacidad para realizar tareas en tiempo real son de suma importancia.

- Unidad Central de Procesamiento (CPU): Es el cerebro del microcontrolador, responsable de ejecutar instrucciones de programas.
- Memoria: Incluye memoria de solo lectura (ROM) para almacenar el firmware y memoria de acceso aleatorio (RAM) para datos temporales.
- Periféricos: Incluyen puertos de entrada/salida, temporizadores, conversores analógico-digitales (ADC), y más, que permiten la interacción con el entorno externo.

Su diseño optimizado permite un consumo de energía reducido, esencial para aplicaciones portátiles y de bajo consumo. Son relativamente económicos en comparación con los microprocesadores, integrando múltiples funciones en un solo chip, reduciendo el espacio necesario en los dispositivos.

Las tarjetas de desarrollo son plataformas de hardware que permiten a los ingenieros y desarrolladores probar y prototipar sistemas embebidos. Estas tarjetas incluyen un microcontrolador y varios componentes adicionales que facilitan la programación y la interacción con otros dispositivos. Los periféricos adicionales que incorporan las tarjetas de desarrollo son sensores, LEDs... Permiten realizar pruebas de funcionalidad.

Algunos de los ejemplos más populares para tarjetas de desarrollo son:

- Arduino: Muy popular en la educación. Arduino ofrece una amplia variedad de placas que son fáciles de usar y programar.
- Raspberry Pi: Aunque es más un ordenador reducido que un microcontrolador, se utiliza ampliamente en proyectos embebidos.
- ESP32: Con capacidades de WiFi y Bluetooth integradas, es ideal para proyectos de Internet Of Things (IoT).

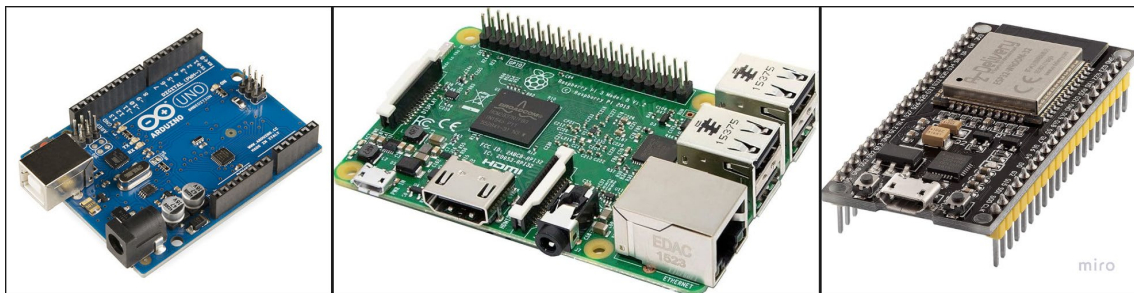


Figura 7. Arduino, Raspberri Pi y ESP32.

## 2.6 MAQUINAS DE ESTADOS FINITOS

Las máquinas de estados son modelos de comportamiento utilizados en diseño de sistemas digitales y software de sistemas embebidos, videojuegos, protocolos de comunicación, etc. Representan sistemas que pueden estar en uno de varios estados. Cambian de un estado a otro en respuesta a eventos o condiciones externas. Se componen de estados, transiciones y acciones. Un ejemplo típico es un semáforo que cambia entre los estados "verde", "amarillo" y "rojo" en respuesta a temporizadores.

Las máquinas de estados finitos (FSM) presentan múltiples ventajas en el diseño y desarrollo de software para sistemas embebidos, superando a los enfoques tradicionales de programación en varios aspectos clave. Estas ventajas se manifiestan tanto en la claridad y organización del código como en la facilidad de mantenimiento, escalabilidad y robustez del sistema. Las principales ventajas de utilizarlas frente a otros sistemas son:

- **Modularidad.** Al definir claramente los estados y las transiciones entre ellos, se logra una mejor organización del código. Esto no solo facilita la lectura y comprensión del programa, sino que también permite una estructuración más lógica y ordenada del flujo de control. Además, la facilidad de modificación es significativamente mayor en sistemas basados en FSM. Cuando se necesita agregar, eliminar o modificar un estado o una transición, estas operaciones son más simples y menos propensas a introducir errores
- **Determinismo.** La predictibilidad del comportamiento es esencial en sistemas embebidos, donde la precisión y la fiabilidad son fundamentales. Las FSM aseguran que las transiciones entre estados ocurran de manera controlada y predecible, lo que reduce la probabilidad de errores.
- **Reutilización.** Al diseñar estados y transiciones como módulos bien definidos, estos pueden ser reutilizados en diferentes partes del sistema o incluso en distintos proyectos.

En resumen, las máquinas de estados finitos ofrecen una serie de ventajas significativas sobre los enfoques tradicionales de programación para sistemas embebidos. Estas ventajas no solo mejoran la eficiencia del desarrollo, sino que también contribuyen a la creación de sistemas más fiables y fáciles de mantener.

### **CAPÍTULO 3. EL SISTEMA: SISTEMA HÍBRIDO PILA DE COMBUSTIBLE-BATERÍA**

El diseño y modelado del sistema completo pila de combustible-batería está desarrollado en [1] por el equipo de investigación formado por Raúl Marqués, Álvaro Montero, Carlos Sánchez-Díaz y Israel Quintanilla. Que se representa en la Figura 8.

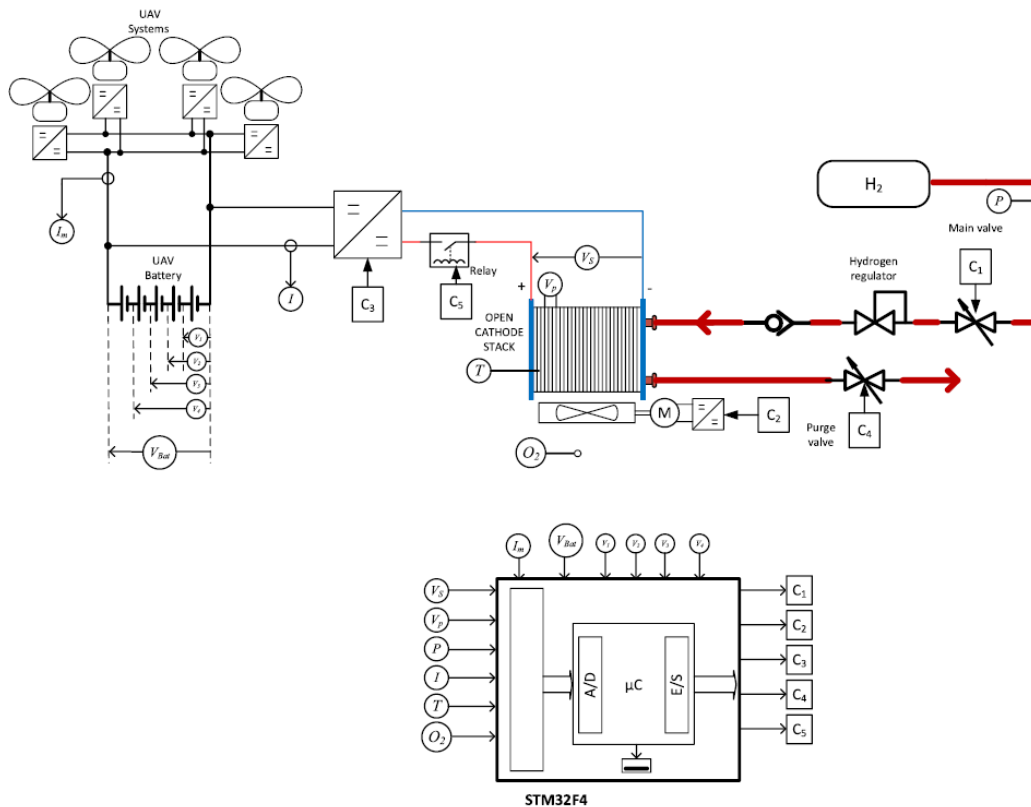


Figura 8. Esquema conceptual del sistema híbrido pila de combustible-batería en un dron.[1]

Como se observa el sistema está formado por distintos bloques que se describen brevemente a continuación:

- *El sistema de propulsión.* 4 rotores con sus correspondientes sistemas de control y gestión de potencia. Este bloque del sistema se alimenta de la batería LiPo. Los motores y su control quedan fuera del alcance de este TFG, a la vista del sistema es una carga electrónica variable.
- *La batería.* Se encarga de arrancar la PEMFC y alimentar todo el sistema. Es capaz de entregar los picos de corriente solicitados por el sistema de propulsión.
- *Convertidor Boost DC/DC.* Se encarga de elevar el voltaje de la PEMFC al voltaje de carga de la batería. La corriente que entrega depende de la corriente solicitada por el sistema de propulsión, pero con una dinámica más lenta. Es decir, se evitan los picos de consumo por las turbulencias o subidas repentinas del dron proporcionando una corriente de carga constante.
- *PEMFC.* Célula de combustible que actúa como fuente de energía alternativa para cargar en vuelo la batería.
- *Ventilador.* Dispositivo que se encarga de introducir la masa de aire suficiente para que reaccione todo el hidrógeno en el interior de la célula. También es el encargado de refrigerar la célula de combustible.
- *Regulador de hidrógeno.* Elemento mecánico que sirve para controlar el caudal de hidrógeno entrante a la PEMFC. Queda fuera del alcance de este TFG, se considera que la presión de entrada al sistema es correcta y constante.





- *Válvula principal.* Electroválvula principal del sistema con dos posiciones, abierta y cerrada. Permite o cierra el paso de hidrógeno al interior de las celdas de la PEMFC.
- *Válvula de purgado.* Electroválvula que controla el purgado de las celdas de la PEMFC. El purgado es necesario para limpiar las impurezas del aire ambiental que la recorre. También tiene dos posiciones, abierta o cerrada.
- *Depósito de hidrógeno.* Contiene el combustible para la reacción en la PEMFC. Queda fuera del alcance de este TFG, la presión de hidrógeno en el sistema se considera constante.
- *Sensores de corriente.* Monitorizan la corriente solicitada por el sistema de propulsión y la corriente de carga que proporciona el convertidor Boost para ajustar correctamente el ciclo de trabajo de este.
- *Sensores de temperatura.* Adquieren la temperatura de la PEMFC y de la batería, son medidas críticas ya que indican el correcto funcionamiento de ambas.
- *Sistema de control digital.* Es el objeto de este TFG, está formado por la tarjeta de desarrollo, los periféricos adicionales y circuitos de control para manejar los actuadores además del acondicionamiento de las señales analógicas de entrada.

El sistema de generación de energía híbrido propuesto utiliza hidrógeno como combustible y, por tanto, extiende el rango de vuelo del UAS. La pila de combustible que conforma una parte del sistema de generación de energía es una PEMFC de cátodo abierto. Consume el hidrógeno del depósito y lo hace reaccionar con el oxígeno presente en el aire, produciendo una corriente eléctrica.

El proceso de conectar una celda de combustible a un sistema de energía de un UAS es complejo debido a los efectos adversos de las variaciones súbitas de corriente en la operación de la celda de combustible, lo que puede secar o inundar su membrana, reduciendo su eficiencia y su vida útil [1]. Sin embargo, estos efectos se pueden evitar introduciendo una batería de Litio Polímero (LiPo) y un convertidor DC/DC. El control de la corriente de carga se hace solamente con el convertidor para minimizar el peso y aumentar la autonomía.

La batería LiPo es adecuada ya que es un dispositivo electroquímico capaz de almacenar la energía y entregarla rápidamente. En situaciones como el despegue o aterrizaje debe ser capaz de entregar los picos de corriente solicitados por el sistema de propulsión. Además, la PEMFC necesita una pequeña cantidad de energía inicial para iniciar el balance de la planta.

El convertidor boost es el encargado de proporcionar energía a la batería de manera que la corriente de carga sea constante. La introducción del convertidor cumple dos funciones principales. En primer lugar, eleva el voltaje a la tensión de carga de la batería, superior a la que proporciona la salida de la PEMFC. En segundo lugar, debe asegurar la integridad de la batería LiPo. Las tensiones de la batería están continuamente monitorizadas por el control digital. En caso de desbalanceo del voltaje entre las celdas el convertidor ha de asegurar que no se introduce más corriente para cargar la batería.

Hidrógeno presurizado a unos 200 bar es almacenado en el tanque de hidrógeno. El hidrógeno se suministra al sistema mediante un regulador mecánico para rebajar la presión de almacenamiento a la de operación. Una vez se ha reducido la presión del combustible, pasa por la válvula principal. Esta actúa como medida básica de seguridad. Es una válvula solenoide de tipo normalmente cerrada ya que, en caso de emergencia, es necesario cortar el flujo de hidrógeno desde el sistema de control digital. La válvula de purgado se encarga de eliminar las impurezas que se van depositando en el interior de las celdas debido al uso del aire ambiente. El voltaje total de la pila

de combustible y el de la última celda se miden como información para el control digital. Con el voltaje total se calcula el voltaje medio de cada celda. Una vez obtenido el voltaje medio se compara con el voltaje de la última celda (la que contiene mayor cantidad de impurezas). El resultado de esta comparación abre y cierra la válvula de purgado, operación imprescindible para asegurar el rendimiento de la planta.

La PEMFC de cátodo abierto cuenta con un ventilador eléctrico que se encarga de introducir al menos el doble de la cantidad de aire necesaria para reaccionar con el hidrógeno en las celdas. Además, ayuda a mantener estable la temperatura de operación de la PEMFC refrigerando la misma.

Como se observa en la Figura 9, un dron solicita picos de potencia en situaciones como el despegue, el aterrizaje o la aparición de turbulencias. La inclusión de la batería LiPo en el sistema permite que la pila de combustible no tenga que entregar estos picos. De esta manera se reduce considerablemente la potencia nominal de la PEMFC y, en consecuencia, su peso y tamaño.

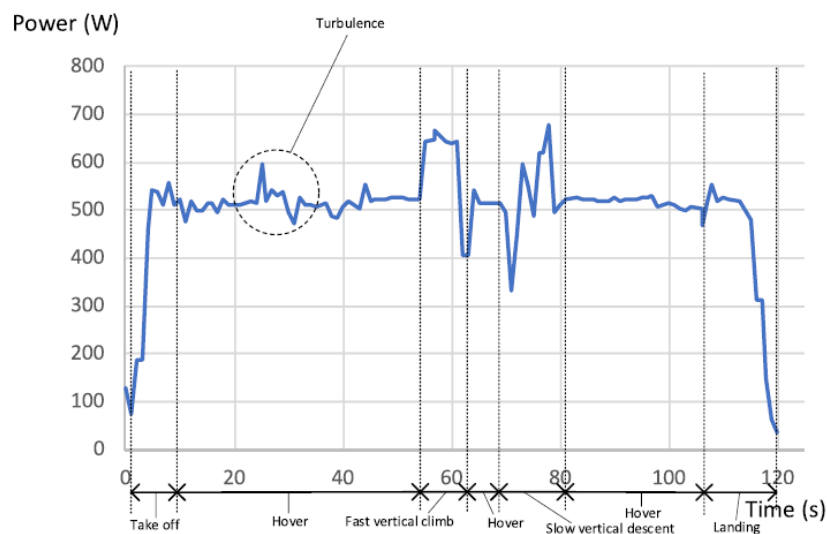


Figura 9. Demanda de potencia de un dron DJI – Matrice 300 RTK en vuelo con una carga de 6.3 kg [1].

Si no se utiliza la batería, las variaciones súbitas en la corriente consumida podrían conducir a un consumo excesivo de hidrógeno para lograr la misma salida de potencia, sin mencionar posibles problemas en la membrana. Se puede encontrar un análisis de este comportamiento en [3].

### 3.1 COMPONENTES

En este apartado se describe de manera detallada las características y comportamiento de los componentes que interactúan con el sistema de control digital y establecen el funcionamiento del sistema. Estos elementos son propios del sistema diseñado por H2Drone en [1].

#### 3.1.1 BATERÍA

La batería LiPo que incorpora el sistema es la de la marca G-Tech de la Figura 3 con una configuración 12S1P lo que significa que está compuesta por 12 celdas iguales conectadas en serie. Sus características están reflejadas en la Tabla 3.

<b>Capacidad</b>	5000 mAh
<b>Voltaje</b>	44.4 V



<b>Descarga Continua Máxima</b>	60C (300 A)
<b>Descarga Instantánea Máxima</b>	120C (600 A)
<b>Peso (<math>\pm 10g</math>)</b>	1523 g
<b>Dimensiones</b>	320*50*50 mm
<b>Conector de Descarga</b>	EC5
<b>Tasa de Carga</b>	1-3C Recomendado, 5C Máximo

Tabla 3: Características batería G-Tech 5000mAh 60/120C 44.4V 12S1P

### 3.1.2 PEMFC

La celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) H100 de Horizon Fuel Cell Technologies es una solución avanzada para aplicaciones de generación de energía en pequeña a mediana escala. Con una potencia nominal de 100 W, esta celda utiliza hidrógeno como combustible y aire como oxidante, ofreciendo una fuente de energía limpia y eficiente. La H100 está diseñada para ser fácil de usar e integrar en proyectos de investigación. Sus características están descritas en la Tabla 4.

<b>Tipo de Producto</b>	Celda de combustible PEM
<b>Número de celdas</b>	20
<b>Potencia Nominal</b>	100W
<b>Rendimiento Nominal</b>	12V @ 8.3A
<b>Reactivos</b>	Hidrógeno y aire
<b>Presión del Hidrógeno</b>	0.45 – 0.55 bar
<b>Pureza del Hidrógeno</b>	$\geq 99.995\%$ (hidrógeno seco)
<b>Temperatura Máxima del Stack</b>	65°C
<b>Refrigeración</b>	Aire (ventilador integrado)
<b>Peso del Stack</b>	1290g $\pm$ 30g
<b>Dimensiones del Stack</b>	118 x 104 x 94 mm
<b>Tiempo de Arranque</b>	$\leq 30$ segundos a temperatura ambiente
<b>Eficiencia del Sistema</b>	40% a 12V

Tabla 4. Características técnicas de la célula de combustible H100 de Horizon Technologies

Esta PEMFC incorpora su propio sistema de control de las válvulas, convertidor de salida y ventilador como se observa en la Figura 10. El objetivo de este TFG es diseñar el sistema de control digital que sustituya al que lleva el stack integrado. De esta manera se tiene un control de la tecnología, pudiendo incrementar su eficiencia y teniendo un control y monitoreo de cada uno de los parámetros del sistema. Esto sería imposible utilizando el sistema de control desarrollado por Horizon Technologies.

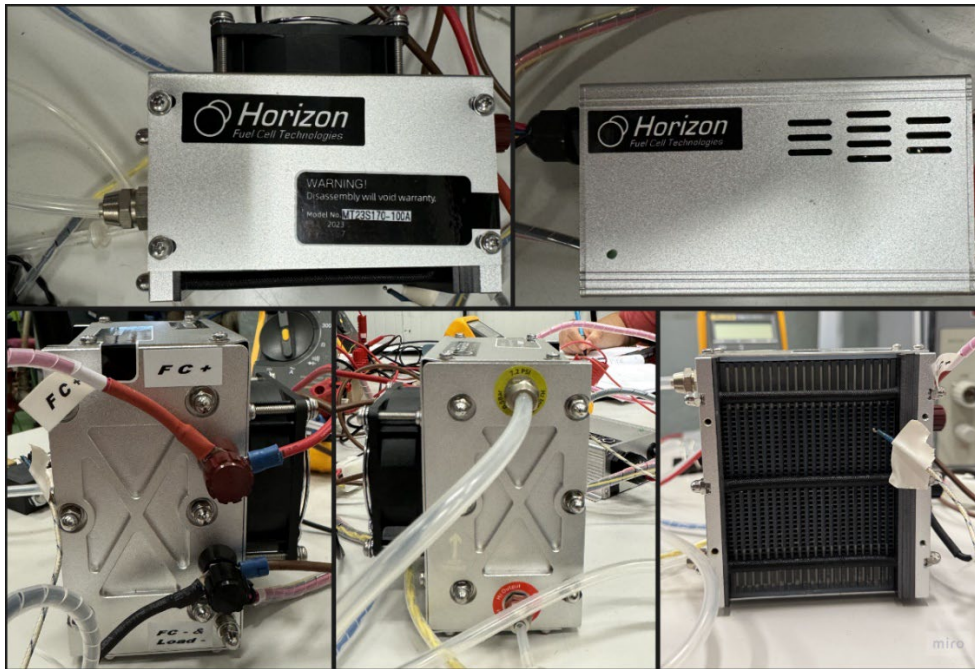


Figura 10. Vistas de la H100, PEMFC que forma parte del sistema híbrido.

## 3.2 LOS SENSORES

Los sensores son una parte crucial de cualquier sistema digital. Son capaces de monitorizar los elementos del sistema, asegurando su funcionamiento correcto. Proporcionan información precisa sobre el comportamiento del sistema híbrido para que sea monitorizada por el control digital.

### 3.2.1 SENSORES DE CORRIENTE

En un sistema que opera con corrientes de carga y consumo del orden de amperios, es crucial monitorearlas con precisión. Esto es especialmente importante en el sistema de un dron, ya que la corriente suministrada por la batería de litio es fundamental para mantener su sustentación. Las dos corrientes que medir en el sistema son:

- *Corriente consumida por el sistema de propulsión.* Esta corriente indica el consumo instantáneo de potencia por el dron para su sustentación y movimiento. Es importante que sea monitorizada por el sistema ya que nos indica la velocidad de descarga de la batería de Litio. Por tanto, permite al control digital modular el ciclo de trabajo del convertidor boost según la corriente de carga requerida por la batería.
- *Corriente de carga entregada por el convertidor boost.* Es importante monitorizar la corriente de carga entregada para asegurar un funcionamiento correcto del convertidor. Es un dato crítico en el sistema, si no corresponde con la corriente asociada al ciclo de trabajo introducido por el control digital podría indicar una falla en el sistema.

### 3.2.2 SENSORES DE VOLTAJE DE LA PEMFC Y DE LA BATERÍA

Las señales de voltaje que son monitorizadas por el sistema de control digital en algunos casos son del orden de decenas de voltios. El microcontrolador no admite tensiones tan altas, es



necesario incorporar circuitos de acondicionamiento para adaptar estas señales. Las señales de voltaje vienen de dos subsistemas:

- *Voltajes de celda de la batería.* Las baterías LiPo son dispositivos electroquímicos muy delicados. Es necesario monitorizar continuamente los voltajes de cada una de las celdas, asegurando su equilibrio. Además, es importante conocer el voltaje total de la batería ya que indica su nivel de carga.
- *Voltajes de la PEMFC.* Dentro de la PEMFC es crucial monitorizar 2 voltajes. El voltaje total del stack y el de la última celda. La última celda es la que más impurezas acumula, cuando su voltaje desciende por debajo de la media de las demás celdas indica que hay un exceso de impurezas. Cuando el control digital detecta este exceso de impurezas activa la válvula de purgado.

### 3.2.3 SENSORES DE TEMPERATURA

El sistema requiere dos sensores de temperatura que se encargan de adquirir las temperaturas de la PEMFC y de la batería. Estos sensores se encargan de convertir los valores de temperatura a voltajes que puedan ser leídos por el microcontrolador. Las temperaturas se monitorizan por los siguientes motivos:

- *Batería.* Cuando no se está produciendo una carga eficiente de la batería LiPo, se producen pérdidas energéticas que se manifiestan en forma de calor. Es necesario conocer cuando se produce la carga ineficiente para interrumpirla y así preservar el buen estado de los materiales.
- *PEMFC.* El ventilador refrigera la batería según la temperatura de esta. Por esta razón es imprescindible conocer su temperatura, pudiendo variar así de forma correcta la masa de aire que desplaza el ventilador.

## 3.3 LOS ACTUADORES

### 3.3.1 VÁLVULA PRINCIPAL

La válvula principal del sistema se encarga de abrir o cerrar el suministro de combustible. Debe ser gobernada por el sistema de control digital, por lo que ha de ser una válvula solenoide.

Una válvula solenoide, también conocida como una válvula de funcionamiento eléctrico, es una válvula que utiliza la fuerza electromagnética para funcionar. Cuando se pasa una corriente eléctrica a través de la bobina del solenoide, se genera un campo magnético que hace que se mueva una varilla de metal ferroso. Este es el proceso básico que abre la válvula [13]. La válvula solenoide es de tipo normalmente cerrada. Si hay una falla en la válvula es imprescindible asegurar el corte del flujo del combustible hacia el stack. Concretamente, la válvula del sistema es el modelo 2V025 12VDC de la marca SNS como se puede observar en la Figura 11.

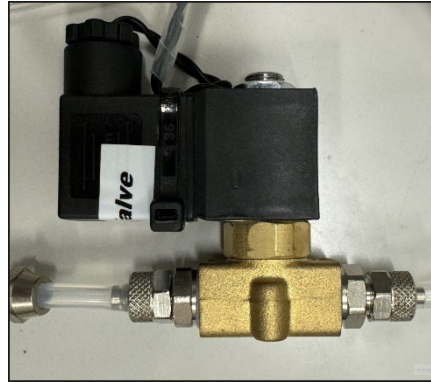


Figura 11. Válvula principal de entrada del combustible a la PEMFC.

### 3.3.2 VÁLVULA DE PURGADO

La válvula solenoide de purgado sirve para limpiar las impurezas del aire que quedan atrapadas en los conductos de la pila de combustible. Es una pieza clave en el sistema ya que mantiene la eficiencia de este. Está gobernada por el control digital y es de tipo normalmente cerrada.

### 3.3.3 VENTILADOR

El ventilador se encarga de proporcionar un caudal de aire a la pila de combustible que le proporciona refrigeración además de la cantidad de oxígeno necesaria para reaccionar con todo el hidrógeno que circula por las celdas del stack. Se alimenta a 12 V y se pretende controlar el caudal de este mediante el control PWM de un transistor Mosfet que controle la corriente de consumo.



Figura 12. Ventilador de 12 V de la PEMFC.

### 3.3.4 Convertidor DC/DC boost

El convertidor DC/DC del sistema es un convertidor boost, también llamado convertidor elevador. El convertidor boost desempeña 2 funciones. La primera, proporcionar una corriente de carga constante que sea mayor que el valor medio consumido por el sistema completo. De esta manera se introduce más energía de la que se consume en la batería LiPo y se consigue recargarla en vuelo. La segunda, proporcionar un sistema seguro de desconexión entre la PEMFC y la batería LiPo. En caso de que la batería supere el voltaje máximo (indicador de que está cargada) o de que

alguna de sus celdas se desequilibre tiene que ser capaz de igualar la corriente de carga de la batería LiPo a 0.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

### 4.1 NECESIDADES DEL PROBLEMA

Ante el sistema planteado se necesita diseñar una solución que permita realizar el control digital y monitorización de todos los bloques. Además, el sistema deberá de ser capaz de transmitir la información en tiempo real a un PC para su análisis en funcionamiento.



Figura 13. Esquema del graficado de los datos en tiempo real.

La solución adecuada para estas necesidades es el uso de una tarjeta de desarrollo basada en un microcontrolador. En el mercado se pueden encontrar diversas configuraciones y periféricos incluidos en las tarjetas que pueden ser controlados por el microcontrolador, además incluyen un depurador de código, memoria y un oscilador.

Para monitorizar las temperaturas y medir las corrientes del sistema son ideales sensores que trabajen de manera lineal, con salidas de voltaje en rangos cercanos a los aceptados por el control digital. También es importante que su tamaño y coste sean reducidos. Para la lectura de los voltajes de la PEMFC y de la batería LiPo son necesarios circuitos de acondicionamiento que reduzcan sus voltajes al rango de entrada de un microcontrolador.

Para la generación de la señal analógica que permitirá indicar al convertidor DC/DC la corriente de carga es necesario utilizar un DAC (Digital to Analog Converter).

Para alimentar todo el sistema híbrido y además el control digital es necesario un circuito que reduzca el voltaje de 44.4 V a los voltajes de trabajo típico necesarios para los actuadores del sistema y la mayoría de los CI del control digital.

Para la transmisión de datos en tiempo real al PC es necesario convertir la codificación de la línea UART a protocolo USB. Para esto existen pequeños circuitos con conector micro-usb integrado.

### 4.2 ELECCIÓN DE COMPONENTES

#### 4.2.1 TARJETA DE DESARROLLO

La tarjeta de desarrollo se selecciona según las necesidades específicas del sistema, el microcontrolador y la placa de desarrollo han de tener los siguientes bloques:





- *ADC*. Para leer las salidas de voltaje de los sensores, los voltajes de celda de la batería LiPo y los voltajes de celda de la PEMFC.
- *Entradas y salidas digitales*. Son necesarias para el control de las salidas o la lectura de valores digitales de entrada.
- *Comunicación SPI (Serial Protocol Interface)*. Es necesaria para el manejo del convertidor DAC que generará la tensión analógica de control del convertidor boost.
- *Timers*. Necesarios para temporizar acciones de salida y operaciones internas en el control digital.
- *Comunicación UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)*. Es necesaria para la transmisión de datos en tiempo real debido su fácil implementación y rapidez de transmisión.
- *Generación PWM (Pulse Width Modulation)*. Es necesaria para la variación del ciclo de trabajo del ventilador que controla el caudal de aire.

Además de estas características específicas de la tarjeta de desarrollo, es necesario que sea de bajo coste y su peso sea reducido.

Una familia de tarjetas de desarrollo que combina todas estas características con un bajo coste y peso mínimo es la Nucleo-144 fabricada por STMicroElectronics.

La tarjeta de desarrollo Nucleo-F412ZG de STMicroElectronics es una plataforma versátil que cumple con todas las necesidades técnicas mencionadas anteriormente. La Nucleo-F412ZG incluye un depurador/programador ST-LINK/V2-1 integrado, lo que simplifica el proceso de desarrollo al eliminar la necesidad de herramientas adicionales. Además, es totalmente compatible con el entorno de desarrollo STM32CubeIDE que será utilizado para la configuración y programación del software, proporcionando una solución integral para el desarrollo y la depuración del sistema de control digital.

#### 4.2.2 SENSOR DE TEMPERATURA

En la detección de temperatura para aplicaciones de precisión y tamaño compacto, existen varias alternativas. Los termopares son ampliamente utilizados debido a su amplio rango de temperatura y rápida respuesta, sin embargo, requieren circuitos de compensación de unión fría y pueden ser susceptibles a interferencias electromagnéticas. Los sensores RTD (Resistance Temperature Detectors) ofrecen alta precisión y estabilidad, pero tienden a ser más grandes y caros, además de requerir circuitos de acondicionamiento de señal más complejos. Por otro lado, los termistores NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) son económicos y pequeños, pero su precisión y estabilidad a largo plazo son limitadas, lo que los hace menos adecuados para aplicaciones que requieren mediciones precisas a lo largo del tiempo.

En este contexto, el sensor de temperatura LMT85 basado en tecnología CMOS de Texas Instruments se presenta como una solución ideal debido a su pequeño tamaño, facilidad de uso y bajo coste. Este sensor proporciona una salida de voltaje directamente proporcional a la temperatura, eliminando la necesidad de circuitos adicionales para el acondicionamiento de la señal. Proporcionando una salida entre 0 y 2 V es perfecta para el ADC del microcontrolador. Su diseño compacto permite su integración entre las celdas de la batería LiPo con una finura de 1.5 mm en el empaquetado de la Figura 13. Esquema del graficado de los datos en tiempo real.. Además, su baja corriente de operación y rápida respuesta lo convierten en una opción eficiente

y confiable para la medición de temperatura [14]. Por estas razones, el LMT85 ha sido seleccionado como la mejor opción para nuestra aplicación específica.

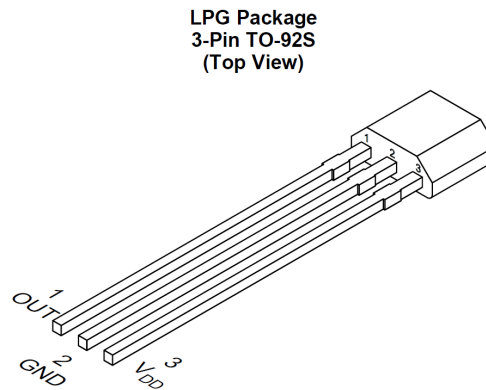


Figura 14. Sensor de temperatura LMT85.

El CI consta de 3 pines:

- *Vdd*. Pin de alimentación conectado a una tensión de 5 V.
- *Gnd*. Pin de referencia conectado a la tierra del sistema.
- *OUT*. Pin de salida con un voltaje inversamente proporcional a la temperatura sensada.

#### 4.2.3 SENSOR DE CORRIENTE

El método tradicional para medir la corriente es medir la caída de voltaje a través de una resistencia voluminosa, lo cual no es conveniente para el aislamiento eléctrico entre el sistema digital y las etapas de potencia. Usar sensores Hall para la medición no solo reduce el tamaño del sistema y ofrece un mejor aislamiento y precisión, sino que además no afectará al circuito medido [15]

El sensor basado en efecto hall ACS712 de la Figura 15 fabricado por Allegro mide la corriente de forma precisa y lineal. Con una ruta de conducción de cobre ubicada cerca de la superficie del chip, la corriente que fluye a través de esta ruta de conducción de cobre genera un campo magnético que es detectado por el CI a su vez convertido en un voltaje proporcional.

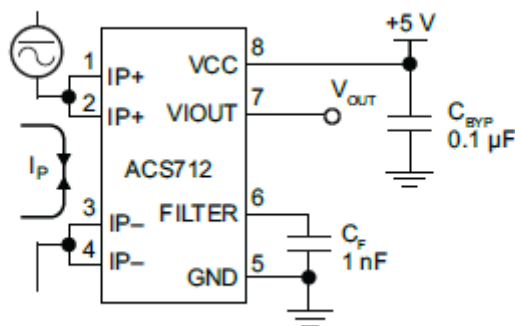


Figura 15. Pinout y aplicación típica para la medida de corriente [16].

El circuito elegido para monitorizar las corrientes está constituido por una placa de circuito impreso con el sensor de corriente ACS712 desarrollada por Muñoz en su TFG [17]. Esta placa de circuito impreso incluye los elementos externos sugeridos por Allegro en su datasheet [16] y se muestra en la Figura 16.

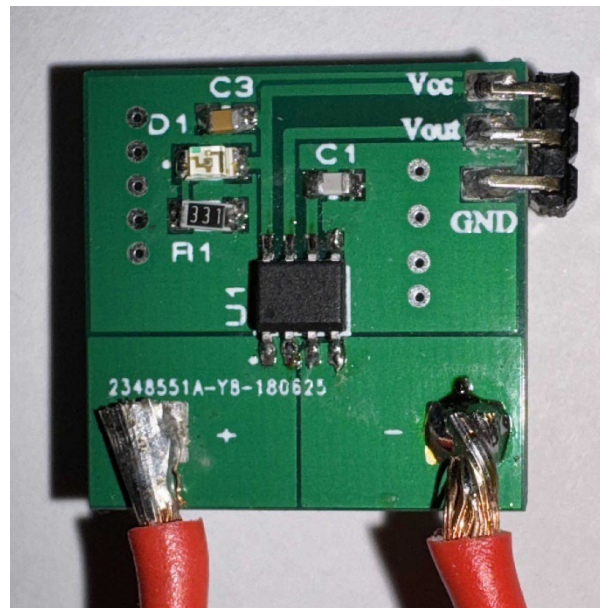


Figura 16. Placa de circuito impreso con el ACS712 integrado.

La placa de circuito impreso consta de 5 terminales:

- *Vcc*. Pin de alimentación conectado a una tensión de 5 V.
- *Gnd*. Pin de referencia conectado a la tierra del sistema.
- +. Pin donde el flujo de corriente eléctrica se introduce en el sensor para su medición.
- -. Pin donde la corriente eléctrica se reintroduce al resto del sistema después de pasar por el sensor.
- *Vout*. Pin de salida analógica de tensión directamente proporcional a la corriente que circula a través del sensor.

#### 4.2.4 REGULADOR DE VOLTAJE CONMUTADO

La batería LiPo alimenta tanto al sistema híbrido como al sistema digital. Sin embargo, el sistema de control digital y los actuadores trabajan con voltajes de 3.3-5 V y 12 V respectivamente.

Se podría pensar que un regulador de voltaje lineal como el L7812CV ofrecido por STMicroelectronics es una buena solución. Sin embargo, el voltaje máximo admitido por este tipo de reguladores no supera los 35 V como se indica en [18]. Por tanto, la única solución es utilizar un CI con transistor MOS integrado que además aporta ventajas como la estabilización de la salida o una mayor corriente de carga máxima.

El CI elegido es el convertidor buck TPS54360B-Q1 fabricado por Texas Instruments que admite hasta 60 V en la entrada, más que suficiente para cumplir los requerimientos del sistema. Aporta



ventajas como una eficiencia mayor al 90%, consumo mínimo de corriente, tamaño y coste reducido. Además, Texas Instruments nos ofrece WEBENCH designer, una herramienta online muy útil para el diseño de los componentes externos al convertidor como pueden ser la bobina o el condensador de salida. Estos componentes los selecciona según ciertos parámetros que se le indiquen como pueden ser voltaje de entrada, voltaje de salida, rizado de voltaje en la salida, corriente de carga máxima o la corriente de carga nominal. Esta herramienta es online y se llama *WEBENCH designer* pudiéndose observar en la Figura 17.

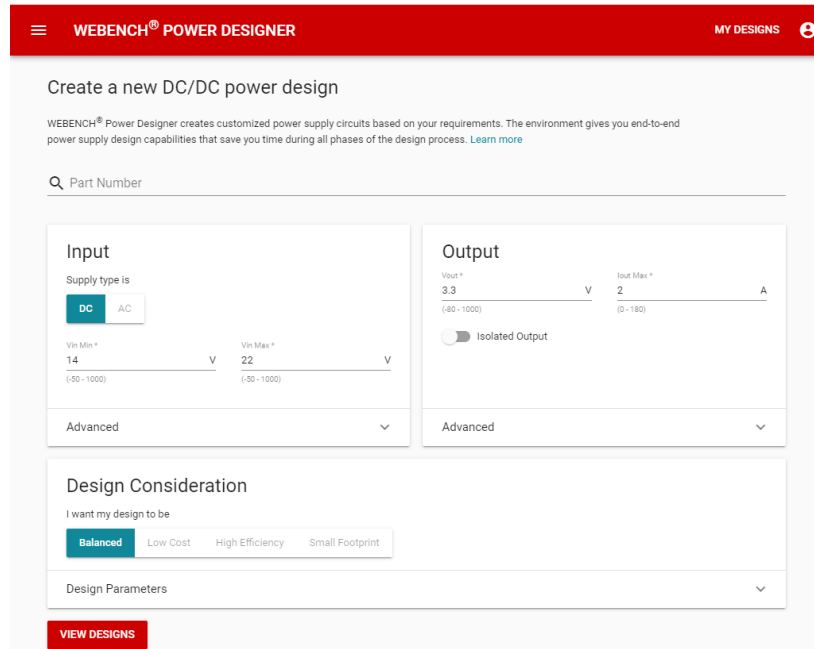


Figura 17. Interfaz de la herramienta online WEBENCH de Texas Instruments.

#### 4.2.5 CONVERTIDOR DIGITAL ANALÓGICO

El convertidor DC/DC principal del sistema es el encargado de la carga de la batería LiPo y por tanto de mantener el dron con carga suficiente para extender su autonomía. El convertidor boost trabaja en modo de control de corriente media, modificando el ciclo de trabajo del convertidor en función del voltaje situado en su entrada de control. La señal de control varía entre 2.5 y 4 V por lo que el DAC a elegir debe poder cumplir esas especificaciones de salida. Un tiempo de establecimiento rápido, comunicación robusta, bajo coste y peso reducido son algunas de las características necesarias para el sistema.

La opción seleccionada es el MCP4921 fabricado por Microchip, ofrece una resolución de 12 bits lo que lo hace perfecto para un control preciso del convertidor DC/DC. Soporta comunicación SPI, rápida y compatible con la tarjeta de desarrollo. Permite la introducción de un voltaje de referencia externo y su voltaje máximo de operación es de 5.5 V como se indica en [19]. Es de bajo coste y el empaquetado es reducido.

Como característica fundamental tiene la opción de configurar un buffer interno para reducir la impedancia de salida del DAC y así asegurar la integridad y precisión de la señal. Los componentes que colocar externamente son mínimos, facilitando el diseño del DAC.

#### 4.2.6 MÓDULO DE CONVERSIÓN UART A USB

Para convertir comunicación UART a protocolo USB y poder leer de manera fácil los datos en el ordenador existen varias soluciones en el mercado. Se ha optado por una pequeña placa de desarrollo que incorpora el chip FT232R del fabricante FTDI Chip [20] que se encarga de realizar la conversión de protocolo UART a USB. Incorpora los elementos externos necesarios además de un conector micro-usb para conectarse al PC. La placa es la BOB-12731 de la marca SparkFun.

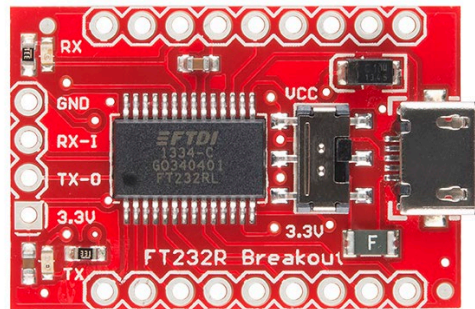


Figura 18. Placa de desarrollo fabricada por SparkFun para la comunicación entre el microcontrolador y el PC.

## CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL HARDWARE

### 5.1 ACONDICIONAMIENTO DE LAS ENTRADAS AL SISTEMA

Todas las entradas del sistema de control digital están representadas por un voltaje que se coloca en los distintos pines del ADC. Tanto la batería como los sensores ofrecen tensiones que proporcionan la información necesaria al sistema. El ADC es el encargado de proporcionar información sobre estas señales a la CPU del microcontrolador.

Los microcontroladores trabajan con niveles lógicos de entre 0 y 5V, concretamente la tarjeta de desarrollo usada para el proyecto admite voltajes máximos de 3.6 V. Como se observa en la Tabla 5 hay una gran variedad de rangos de señal, lo que obliga a centrarse en cada una de las señales para adaptarlas al sistema digital. Además de adaptar los rangos de cada señal es necesario filtrar las componentes de alta frecuencia de las señales según la naturaleza de cada una. De esta manera se obtienen lecturas más nítidas evitando la lectura de interferencias que pueden actuar negativamente en el funcionamiento del sistema.

Por estas razones se hace un análisis exhaustivo de cada señal. Asegurando en primer lugar, la integridad de la señal frente a interferencias. En segundo lugar, estableciendo límites seguros para las señales de tal manera que no pongan en peligro el ADC. En tercer lugar, aprovechando el máximo rango de entrada del ADC para utilizar toda la resolución que ofrece y obtener lecturas más precisas.

Entrada	Descripción	Rango
$V_{ACS1}$	Voltaje equivalente a $I_p$	2.50 – 3.82 V
$V_{ACS2}$	Voltaje equivalente a $I_c$	2.50 – 3.82 V
$V_{LMT1}$	Temperatura de la PEMFC	0.74 – 2.00 V

$V_{LMT2}$	Temperatura de la batería LiPo	0.74 – 2.00 V
$V_{PEMFC1}$	Voltaje generado por la PEMFC	0.00 – 20.50 V
$V_{PEMFC2}$	Voltaje última celda PEMFC	0.00 – 19.50 V
$V_{BAT1}$	Voltaje Celda 1 Batería LiPo	3.30 – 4.20 V
$V_{BAT2}$	Voltaje Celda 2 Batería LiPo	6.60 – 8.40 V
$V_{BAT3}$	Voltaje Celda 3 Batería LiPo	9.90 – 12.60 V
$V_{BAT4}$	Voltaje Celda 4 Batería LiPo	13.20 – 16.80 V
$V_{BAT5}$	Voltaje Celda 5 Batería LiPo	16.50 – 21.00 V
$V_{BAT6}$	Voltaje Celda 6 Batería LiPo	19.80 – 25.20 V
$V_{BAT7}$	Voltaje Celda 7 Batería LiPo	23.10 – 29.40 V
$V_{BAT8}$	Voltaje Celda 8 Batería LiPo	26.40 – 33.60 V
$V_{BAT9}$	Voltaje Celda 9 Batería LiPo	29.70 – 37.80 V
$V_{BAT10}$	Voltaje Celda 10 Batería LiPo	33.00 – 42.00 V
$V_{BAT11}$	Voltaje Celda 11 Batería LiPo	36.30 – 46.20 V
$V_{BAT}$	Voltaje Total Batería LiPo	39.60 – 50.40 V

Tabla 5. Entradas al sistema de control digital

Antes de analizar exhaustivamente cada una de las señales surge un problema a primera vista. El ADC de 12 bit del microcontrolador posee 16 canales. Sin embargo, el sistema nos proporciona 18 señales. Para poder leer todas las señales la mejor solución es multiplexar algunas de ellas. Al multiplexar ciertas señales se perderá la velocidad de lectura de estas, es por ello por lo que se ha estudiado con que velocidad pueden variar estas señales y como de importantes son para el sistema híbrido.

Los voltajes de las celdas de la batería LiPo son los más críticos, un desbalanceo entre las celdas puede provocar que unas celdas se descarguen más rápido que otras. Puede dañar la batería o incluso causar situaciones peligrosas, como incendios o explosiones, especialmente si la batería experimenta cargas y descargas muy intensas [21]. Después del acondicionamiento de estas señales han de ir directamente al ADC para realizar el muestreo de la señal a la velocidad deseada.

Después de adquirir estas 12 señales directamente, quedan 4 entradas del ADC disponibles y 6 señales. Los voltajes de la PEMFC,  $V_{PEMFC1}$  y  $V_{PEMFC2}$ , también son claves, aportan información fundamental para realizar el purgado de las celdas y asegurar el rendimiento del stack.

Finalmente quedan los 4 voltajes que aportan información sobre las corrientes y las temperaturas, se utiliza un multiplexor de tipo 2:1 para estas señales de tal manera que uno de los canales restantes monitorizará las temperaturas y el otro las corrientes. Ya que estas señales evolucionan con una dinámica más lenta se puede permitir reducir la frecuencia de muestreo de estas con el uso de estos multiplexores.

De esta manera se aprovechan todos los canales del ADC como se puede ver en la Figura 19 maximizando el rendimiento del sistema.

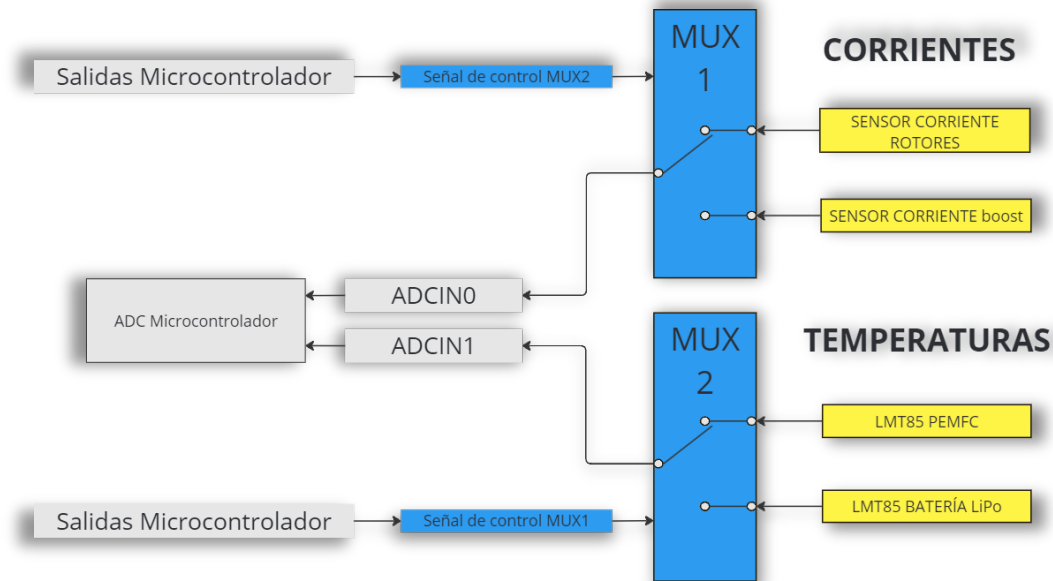


Figura 19. Conexión de los multiplexores con las señales y el ADC

### 5.1.1 DISEÑO DEL ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES

Todas las señales del sistema híbrido que han de ser monitorizadas son de voltaje o han sido convertidas a voltaje por distintos sensores. Sin embargo, el ADC de un microcontrolador y en concreto el de la placa de desarrollo admite una tensión máxima de 3.6 V, no siendo recomendable introducir tensiones superiores a 3.3 V como se indica en [22]. En adición, la mayoría de las señales no empiezan en 0 V, al ser menor el rango de entrada no se aprovecha toda la resolución que ofrece el ADC de 12 bits.

#### 5.1.1.1 Voltajes de la batería LiPo y la PEMFC

Los circuitos de acondicionamiento para la lectura de los voltajes de celda de la batería LiPo y la PEMFC han de cumplir con dos objetivos principales:

- *Reducción del voltaje.* El diseño de los componentes del acondicionamiento tiene que asegurar que las variaciones máximas de las tensiones nunca superen los límites de entrada del ADC del microcontrolador.
- *Atenuación de las altas frecuencias.* Los elementos como el regulador conmutado, los drivers de los MOSFET o los subcomponentes de la tarjeta de desarrollo operan a frecuencias de decenas de kHz. Estas frecuencias pueden introducir ruido no deseado en las medidas, ocasionando medidas erróneas y haciendo el sistema más débil ante interferencias.

Para el primer objetivo se implementan divisores de voltaje y para el segundo se implementan filtros paso bajo pasivos. El ADC necesita que las señales de entrada tengan muy baja impedancia, de manera que pueda solicitar corriente a las mismas. Para asegurar esta entrega rápida de corriente y mantener la integridad de las señales se implementa un buffer de tensión mediante un AO en cada una de las salidas de los circuitos de acondicionamiento.

El circuito general para la medición sigue la estructura de la Figura 20, cambiando los valores de los componentes para cada señal de entrada. Este circuito funciona de manera que el voltaje de

celda es multiplicado por un factor inferior a 1 que depende de las resistencias R1 y POT, posteriormente el condensador en paralelo con la señal filtra las altas frecuencias. Finalmente, el AO actuando como buffer (seguidor de tensión) aísla la señal de la entrada del ADC, proporcionando una salida de baja impedancia.

Para simplificar el posterior diseño del sistema digital se centrarán todas las señales en el mismo valor de 2 V y presentarán el mismo rango en la salida del AO. Se utiliza un potenciómetro en lugar de una resistencia en POT para poder realizar un ajuste final en el montaje y centrar la señal en el valor establecido.

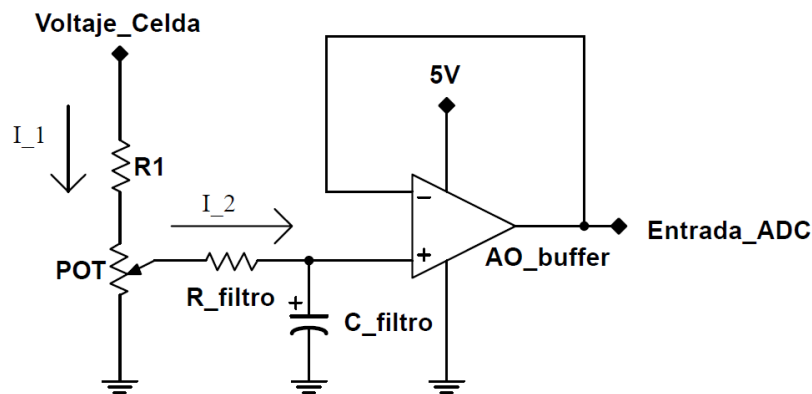


Figura 20. Esquema general de acondicionamiento de los voltajes.

Los divisores resistivos están puramente formados por elementos resistivos. Cuando un voltaje se coloca entre una resistencia, aparece una corriente que la atraviesa. Esta aparición de corriente a través de los circuitos de acondicionamiento tiene dos inconvenientes principales:

- *Disipación de calor.* La corriente consumida por las resistencias genera pérdidas en forma de calor: En caso de que las pérdidas superen los límites establecidos por el fabricante las resistencias pueden quemarse y romperse.
- *Pérdida de energía.* Las medidas que se realizan se obtienen directamente de las dos fuentes de energía del sistema, un consumo alto en la medición resulta en una pérdida de eficiencia del sistema.

Teniendo en cuenta estos dos inconvenientes, se han de diseñar de manera precisa cada uno de los circuitos de acondicionamiento para reducir al máximo la corriente que circule por estos.

Las corrientes  $I_1$  y  $I_2$  que se observan en la Figura 20 son las que entregan los sistema de energía y hay que reducir. La corriente  $I_2$  es mínima ya que los AO no permiten la entrada de corriente a los mismos cuando están realimentados negativamente. Mientras que  $I_1$  sólo depende de las resistencias que se coloquen entre el voltaje de celda y la masa. La corriente  $I_1$  sigue la Ley de Ohm ( 2 ).

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\text{Voltaje}_{\text{celda}}}{R1+POT} \quad (2)$$

El voltaje de celda no se puede modificar ya que es propio del sistema. Para que la corriente sea pequeña el valor de resistencia ha de ser grande.

Sin embargo, hay más consideraciones. Cuando las señales como el voltaje total de la batería LiPo superan las decenas de voltios, es necesario que R1 sea más grande que POT. Según la Ley de Ohm, el voltaje en una resistencia depende de la corriente que la atraviesa y la resistencia de esta. Cuando más grande es la resistencia, mayor es la caída de voltaje. De esta manera si se quieren reducir voltajes grandes, será necesaria una resistencia grande en R1 con relación a POT.

Los filtros paso bajo pasivos están formados por una resistencia en serie con la señal y un condensador en paralelo conectado a masa. El condensador actúa como filtro para las altas frecuencias, bloqueando las bajas. Para calcular los valores de los componentes que lo componen se sigue ( 3 ). Los cambios más rápidos establecidos en ambos sistemas de energía tienen una frecuencia de 50 Hz (20 ms). Para asegurar la obtención de la máxima información de la señal atenuando las altas frecuencias se elige una frecuencia de corte de 1 kHz para los filtros de todos los voltajes.

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi * R * C} \quad (3)$$

Los cálculos de los componentes de los acondicionamientos de las señales y los filtros se encuentran en el anexo de cálculos teóricos. Los esquemas de los circuitos se encuentran en el anexo de los planos.

#### 5.1.1.2 Voltaje de salida sensores de corriente

La salida en voltaje del sensor ACS712 da un valor de 2.5 V cuando la corriente es 0, ya que detecta corrientes que fluyen en sentido contrario, ver en la Figura 21. Para esta aplicación se monitorizan corrientes que solo fluyen en un sentido. Para adaptar la señal al rango de entrada del ADC y además aumentar la resolución, lo indicado es aplicar un restador de voltaje con cierta amplificación de la señal.

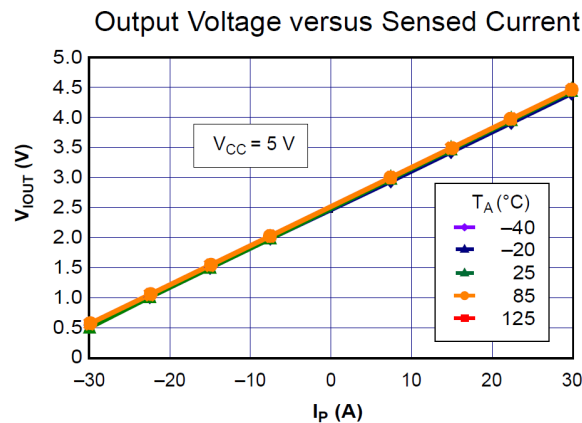


Figura 21. Gráfica de conversión de corriente a tensión del ACS712 [23]

La sensibilidad del sensor es de 66 mV/A como se indica en [16]. Las dos corrientes que medir son  $I_p$  y  $I_c$ , entre las dos la corriente más alta siempre será la consumida por el sistema de propulsión, ya que incluye los picos de potencia por las subidas y bajadas repentinas del dron. Se estima que estos picos de corriente puedan llegar a un máximo de 20 A. Para calcular el valor máximo a la salida se utiliza ( 4 ).

$$V_{ACS712\ max} = V_{offset} + S * I_{P\ max} = 2.50 + 0.066 * 20 = 3.82\ V \quad (4)$$

La herramienta ideal para restar un voltaje a la entrada y amplificar es el amplificador operacional de instrumentación. Ofrece una ganancia variable además de la capacidad de eliminar el offset de una señal aplicando el valor que se desea restar en una de sus salidas y la señal a medir en la otra.

Para realizar este acondicionamiento se selecciona un amplificador operacional de instrumentación muy extendido, el AD623 fabricado por Analog Devices.

El AD623 es un amplificador de instrumentación que proporciona una salida rail-to-rail, lo cual permite manejar señales con un gran margen dinámico [24]. Su ganancia se ajusta mediante una sola resistencia externa, lo que simplifica considerablemente el diseño del circuito. Además, destaca por su alta precisión en corriente continua, asegurando mediciones exactas y estables en aplicaciones críticas. Estas características hacen del AD623 una opción ideal para el sistema, ya que requiere un manejo preciso de señales de pequeña amplitud con altos estándares de precisión.

Aun siendo un AOI rail-to-rail, no puede establecer su salida en valores muy cercanos a 0, para asegurar un funcionamiento correcto, como se observa en la Figura 22 se establece una salida mínima de 1 V para 0 A.

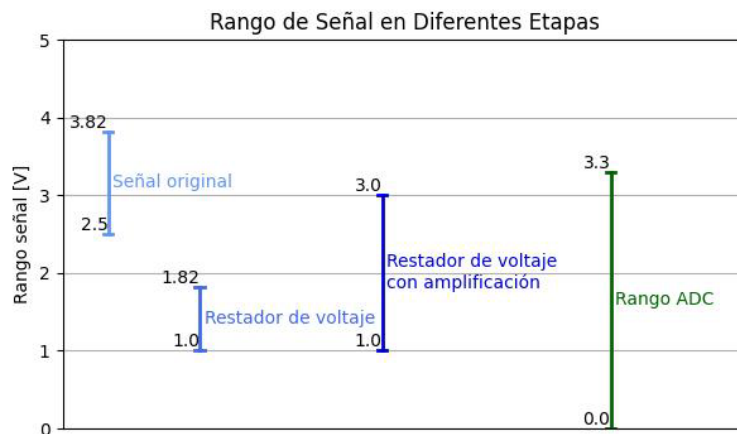


Figura 22. Representación de la evolución de la señal del ACS712 y rango del ADC

En consecuencia, se decide bajar el offset de la señal a 1 V colocando un  $V_{Restador}$  de 1.5 V en la entrada negativa del AOI. Como se ve en la Figura 22 la señal original se elevaría hasta 2.32 V con una corriente de 20 A. Para que la salida máxima del AOI sea de 3 V y aprovechar la resolución que nos ofrece el ADC, la ganancia deseada se calcula con ( 5 ).

$$G = \frac{V_{AOI \max}}{V_{ACS712 \max} - V_{Restador}} = \frac{3.00}{3.82 - 1.50} = 1.293 \frac{V}{V} \quad (5)$$

Para calcular la resistencia externa que regula la ganancia del AOI utilizamos ( 6 ) dada por el fabricante en [24].

$$R_G = \frac{100 \text{ k}\Omega}{G-1} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{1.293-1} = 341.30 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

Como se observa en la Figura 22, la señal tiene un rango mayor y por tanto se logra aprovechar el ADC del microcontrolador al máximo. La sensibilidad después de la etapa de acondicionamiento se calcula con ( 7 ).

$$S = \frac{V_{AOI \max} - V_{AOI \min}}{I_{P \max}} = \frac{3-1}{20} = \frac{100 \text{ mV}}{A} \quad (7)$$

Como se observa en la Figura 23, entre la señal de salida del sensor y la etapa de acondicionamiento se decide colocar un filtro paso bajo para atenuar las altas frecuencias que pueden introducir interferencias. Se decide colocar este filtro pasivo antes de la etapa de



acondicionamiento para evitar amplificar antes de eliminar el ruido. La frecuencia de corte del filtro se establece en 1 kHz y por lo tanto se utiliza el diseño hecho para el filtrado de los voltajes de la batería LiPo y de la PEMFC.

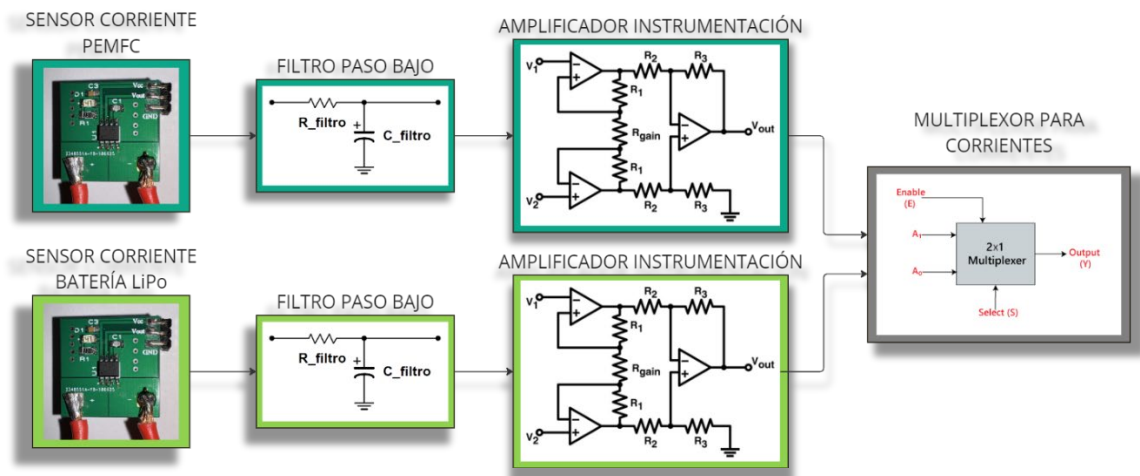


Figura 23. Diagrama de bloques para la señal de los sensores de corriente

Después de filtrar y acondicionar la salida de los sensores de corriente se consigue aumentar el rango de la señal, hacerla robusta ante interferencias y proporcionar una impedancia de salida baja.

### 5.1.1.3 Voltaje de salida sensores de temperatura

La salida del sensor LMT85 es inversamente proporcional a la temperatura como se observa en Figura 24, con una sensibilidad de  $-8.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . El rango de medición del sensor va desde los  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta los  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Sin embargo, en el sistema nunca se experimentan temperaturas por debajo de los  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se establece el rango de temperaturas posibles entre los  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para calcular el voltaje de salida según la temperatura el fabricante proporciona la tabla de transferencia [14].

	Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	Voltaje de salida (mV)
$V_{LMT \text{ max}}$	0	1567
$V_{LMT \text{ min}}$	100	737

Tabla 6. Valores extremos de la salida del LMT85

Para el sensor LMT85 Texas Instruments asegura una constante de tiempos para el dispositivo de 10 segundos. Esto indica que las variaciones de temperatura surgen lentamente. Se decide implementar un filtro paso bajo pasivo a la salida del sensor. Esto asegurará robustez en la señal frente a interferencias. Para el filtro se elige una frecuencia de corte de 10 Hz, su diseño está en el anexo de cálculos teóricos.



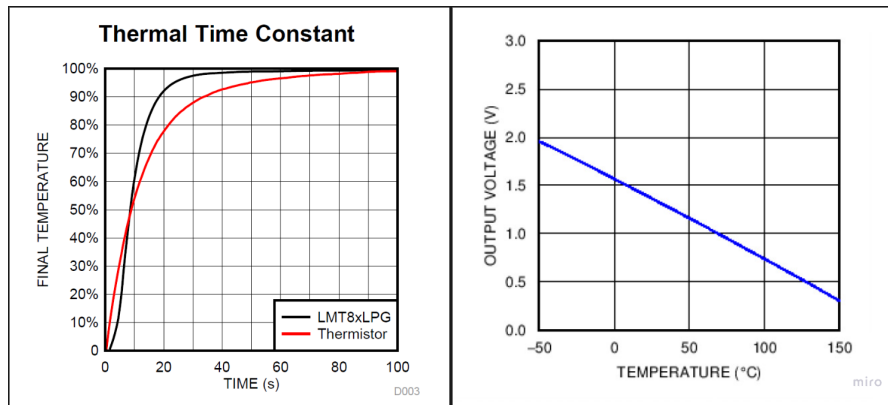


Figura 24. Izquierda: Respuesta temporal del sensor LMT85 frente a un termistor. Derecha: Función de conversión de temperatura a voltaje para el sensor LMT85 [14].

Además, para asegurar una salida de baja impedancia hacia la entrada del ADC se añade un seguidor de tensión mediante AO a la salida del filtro. Finalmente, las salidas de los sensores de temperatura seguirán el siguiente esquema.

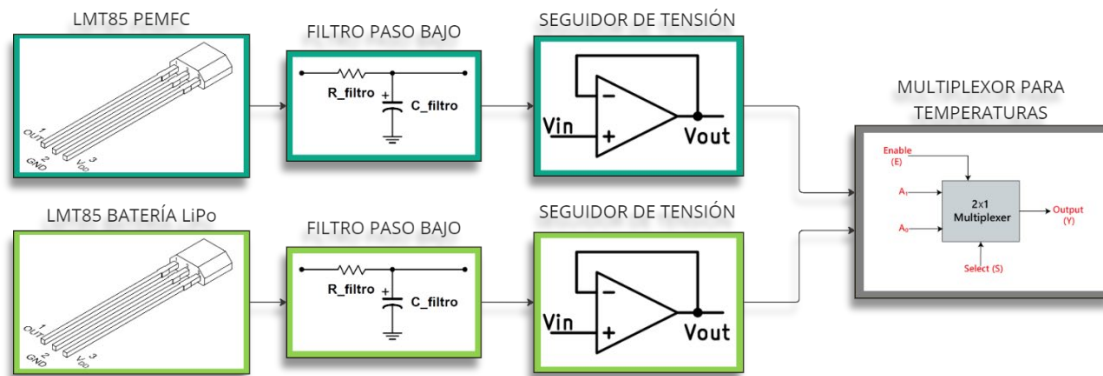


Figura 25. Diagrama de bloques de los sensores de temperatura del sistema híbrido.

#### 5.1.1.4 Multiplexores

Un multiplexor es un dispositivo que permite seleccionar una de varias señales de entrada y enviarla a una única línea de salida. Este proceso es crucial en sistemas donde es necesario monitorizar múltiples señales con un solo convertidor analógico-digital (ADC) o cuando se requiere minimizar la cantidad de cables en el sistema. En el contexto de este sistema, se ha seleccionado el componente 74LVC1G3157-Q100, un multiplexor analógico de 2 canales fabricado por Nexperia. Se ha elegido por la sencillez en su control, baja resistencia de funcionamiento y tiempos de conmutación del orden de nanosegundos [25]. Este dispositivo permite la conmutación de dos señales analógicas mediante un único pin de control digital manejado por el microcontrolador.

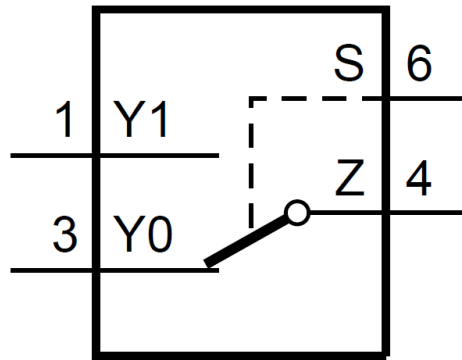


Figura 26. Esquemático del multiplexor 2:1 [25].

La característica crucial de un multiplexor analógico es el tiempo que tarda en cambiar su salida entre las entradas. Este tiempo se conoce como tiempo de propagación. Nexperia asegura un tiempo de propagación máximo de 3 nanosegundos [25]. Este tiempo es ínfimo en comparación a las velocidades a las que trabaja el sistema de control digital del orden de decenas de microsegundos. Se puede considerar que la conmutación del multiplexor es instantánea a ojos del sistema.

Los multiplexores analógicos seleccionados ofrecen un control muy simple sin necesidad de acondicionamiento ni elementos externos a los mismos. Trabajan con tensiones de alimentación de entre 0 y 5 V, para conmutar de una salida a otra simplemente se ha de colocar un voltaje igual a la alimentación en la entrada de control. De esta manera, en nuestro sistema de control digital utilizaremos una salida de propósito general para manejar cada uno de los multiplexores.

## 5.2 SEÑALES DE CONTROL

El sistema de control digital debe ser capaz de manejar el sistema según las reglas establecidas. La tarjeta de desarrollo es capaz de proveer señales de control como pueden ser salidas digitales, señales temporizadas, salidas PWM, etc. Estas van a ser utilizadas para el control del sistema híbrido. Sin embargo, en la mayoría de los casos debido a los requisitos de los actuadores dichas señales han de ser acondicionadas.

En algunos casos como el control de los multiplexores una señal digital generada desde una salida del microcontrolador es suficiente para controlarlo. Pero, por otra parte, otras señales como el disparo de un transistor MOSFET requieren voltajes más elevados. Además, el microcontrolador no está preparado para entregar corrientes del orden de miliamperios, por lo que es necesario incluir drivers para el disparo de los transistores.

Salida	Descripción	Rango
$C_{\delta}$	Señal de control del convertidor DC/DC	2.50 – 5.00 V
$C_{MVALVE}$	Señal de control apertura válvula principal	0.00 – 3.30 V
$C_{PVALVE}$	Señal de control apertura válvula de purgado	0.00 – 3.30 V
$C_{FAN_{PWM}}$	Señal de control PWM del ventilador	0.00 – 3.30 V
$C_{MUXC}$	Señal de control del MUX para corrientes	0.00 – 3.30 V

$C_{MUXT}$	Señal de control del MUX para temperaturas	0.00 – 3.30 V
------------	--------------------------------------------	---------------

Tabla 7. Señales de control del sistema híbrido

## 5.2.1 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL

### 5.2.1.1 Control del convertidor DC/DC

El convertidor DC/DC que se encarga de proporcionar una corriente de carga a la batería LiPo tiene una entrada de control. Esta entrada acepta un rango de voltaje que varía entre 2.5 y 4 V. El voltaje colocado en la entrada de control es directamente proporcional al ciclo de trabajo y por tanto a la corriente de carga. El microcontrolador no es capaz de generar tensiones analógicas de un valor específico. Para cumplir esta tarea se ha seleccionado el MCP4921 de la Figura 27, un DAC de propósito general con una resolución de 12 bits. Este DAC es capaz de establecer una salida de voltaje entre los voltajes de sus pines  $V_{REFA}$  y  $AV_{SS}$  con una precisión más que suficiente, se calcula ( 8 ).

$$S = V_{REF} * \frac{1}{2^{n_{bits}-1}} = 5 * \frac{1}{4095} = 1.22 \frac{mV}{LSB} \quad (8)$$

El microcontrolador se comunica con el DAC mediante una interfaz SPI. La interfaz SPI es un protocolo de comunicación síncrono utilizado para la transferencia de datos entre un microcontrolador y uno o más periféricos. SPI utiliza una arquitectura maestro-esclavo, donde el dispositivo maestro controla la comunicación y los dispositivos esclavos responden a las solicitudes del maestro. Para este caso específico en el que el esclavo no transmite ninguna información las señales clave de SPI son:

- *SCLK (Serial Clock)*. Señal generada por el microcontrolador para sincronizar la transferencia de datos.
- *MOSI (Master Out Slave In)*. Línea por la que el microcontrolador envía un valor digital de 12 bit equivalente al voltaje de salida deseado.
- *CS (Chip Select)*. Señal controlada por el microcontrolador que pone a nivel bajo para indicar que quiere comunicarse con el DAC.

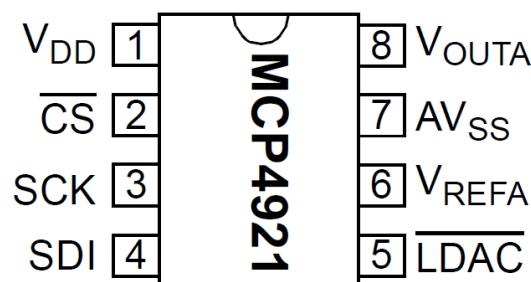


Figura 27. Distribución de pines del MCP4921.

Por tanto, los pines 2, 3 y 4 irán conectados al microcontrolador, el cual manejará la salida del DAC. El pin 7 irá conectado a la masa del sistema mientras que los pines 1 y 6 irán conectados a 5 V. De esta manera el DAC será capaz de ofrecer una salida de entre 0 y 5 V, dentro de los requisitos. El pin 5 permite configurar los registros del ADC cuando se sitúa una señal a nivel alto en su entrada. Al usar la configuración por defecto se pondrá este pin a masa para evitar

problemas. En el pin 8 se genera la señal de salida que irá conectada a la entrada del compensador del convertidor DC/DC.

Aunque el número digital que controla el voltaje de salida es de 12 bits, el DAC recibe 16 bits de información en los que los 12 LSBs controlan el voltaje de salida y los 4 MSBs aportan la información que se observa en la Figura 28.

bit 15	$\overline{\text{A/B}}$ : DAC <sub>A</sub> or DAC <sub>B</sub> Select bit 1 = Write to DAC <sub>B</sub> 0 = Write to DAC <sub>A</sub>
bit 14	<b>BUF</b> : V <sub>REF</sub> Input Buffer Control bit 1 = Buffered 0 = Unbuffered
bit 13	<b>GA</b> : Output Gain Select bit 1 = 1x ( $V_{\text{OUT}} = V_{\text{REF}} * D/4096$ ) 0 = 2x ( $V_{\text{OUT}} = 2 * V_{\text{REF}} * D/4096$ )
bit 12	<b>SHDN</b> : Output Power Down Control bit 1 = Output Power Down Control bit 0 = Output buffer disabled, Output is high impedance

Figura 28. Bits de ajuste del MCP4921[19].

El bit 15 no tiene importancia ya que sólo tenemos un DAC en este CI, el bit 14 se pone a 1 para que la impedancia de salida del DAC sea baja. De esta manera se asegura una entrega rápida de corriente y se mantiene la integridad de la señal. La ganancia deseada es unitaria, bit 13 a 1. Por último, el bit 12 se pone a 1 para activar el buffer de salida. De esta manera se varían de manera digital los 12 LSBs de la transmisión y se consigue establecer el voltaje deseado en la entrada de control del convertidor DC/DC.

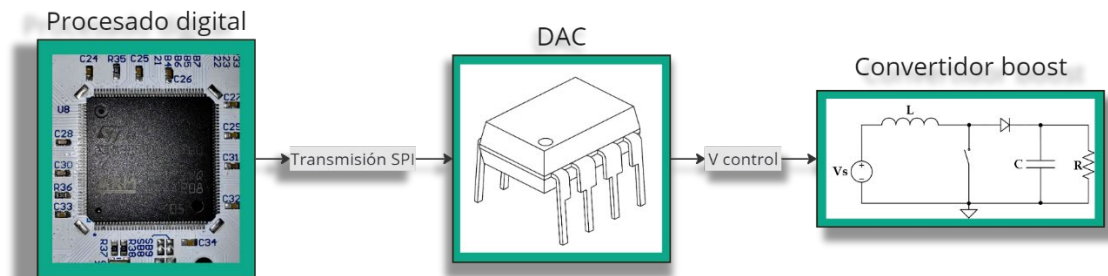


Figura 29. Diagrama de bloques para el control de la corriente entregada por el convertidor boost

### 5.2.1.2 Válvula principal y válvula de purgado

Las válvulas solenoides normalmente cerradas (NC) en ausencia de corriente eléctrica permanecen cerradas por un resorte mecánico. Cuando se aplica una corriente a la bobina, se genera un campo magnético que atrae el émbolo con más fuerza que el resorte, abriendo la válvula y permitiendo el paso del fluido como se observa en la Figura 30. Cuando la corriente eléctrica desaparece, vuelve a su posición de reposo. La corriente necesaria para encender una válvula solenoide a menudo es muy alta (típicamente entre 500 y 1000 mA) y excederá la capacidad de los pines de salida de un microcontrolador. Un transistor MOSFET actuando de interruptor se suele utilizar para este tipo de tareas por su alta eficiencia y capacidad de manejar corrientes altas.

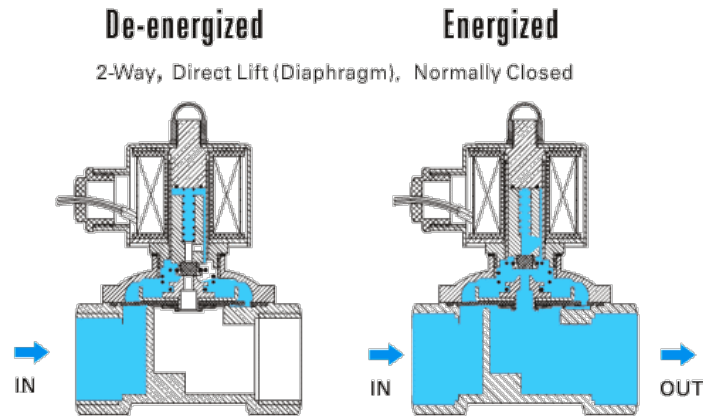


Figura 30. Representación gráfica de una válvula solenoide normalmente cerrada de dos vías. [26]

Los transistores MOSFET de carácter general necesitan una tensión de entre 5 y 12 V entre la puerta y el surtidor para reducir su resistencia de encendido y por tanto ser capaces de manejar corrientes más altas. Las salidas del microcontrolador nunca serán capaces de llegar a dichos voltajes por lo que se selecciona un CI ampliamente usado para esta problemática, un driver MOSFET.

El MIC4416 fabricado por Microchip es un controlador de MOSFET de baja impedancia diseñado para conmutar un MOSFET de tipo N a partir de una señal de control de niveles TTL en aplicaciones de conmutación de baja impedancia. Este driver tiene tiempos de establecimiento del orden de nanosegundos, establecerán un retraso inapreciable a la vista del sistema. El voltaje de salida a nivel alto es aproximadamente igual al del voltaje de alimentación [27]. El driver tiene la función crucial de amplificar la señal del microcontrolador, asegurando que el MOSFET conmute de la manera deseada de una forma eficiente.

Se ha preferido seleccionar un driver antes que buscar MOSFETs específicos que trabajan con niveles lógicos en la puerta por varias razones. La primera es aislar el microcontrolador de la etapa de potencia, protegiéndolo ante posibles sobretensiones o sobrecorrientes. En segundo lugar, los MOSFETs específicos son más escasos y caros. En tercer lugar, para manejar corrientes del orden de amperios trabajan en condiciones límite lo que no es aconsejable para el manejo de señales críticas en el sistema híbrido.

Una vez seleccionados los componentes del circuito se procede a diseñar un circuito que será válido para ambas etapas de potencia de las válvulas.

El microcontrolador se conecta al driver de MIC4416 a través de una salida digital que maneja la apertura y cierre de la válvula. La señal de control se envía desde el microcontrolador al pin 4 del driver (CTL). Cuando esta señal es alta, el driver activa el MOSFET de potencia (IRF830AS), permitiendo que la corriente fluya a través de la válvula, activando la misma.

Se coloca un diodo en antiparalelo con la válvula para proteger al MOSFET. Las válvulas tienen componentes inductivos significativos. Cuando el MOSFET se apaga repentinamente, la corriente que fluye a través de la inductancia no puede cambiar instantáneamente. Esta interrupción rápida de la corriente puede inducir un voltaje elevado a través del MOSFET.

Este fenómeno se describe por la ley de Lenz ( 9 ), esta ley establece que el voltaje inducido en una inductancia es proporcional a la tasa de cambio de la corriente a través de esta.

$$V = L * \frac{dl}{dt} \quad (9)$$

La inductancia intenta mantener la corriente constante, lo que resulta en una alta tensión cuando la corriente se interrumpe abruptamente. Para proteger el MOSFET se elige un diodo rápido y que soporta tensiones elevadas del orden de cientos de voltios. Una opción asequible y que cumple con los requisitos es el BY229 fabricado por Phillips Semiconductors. Con un tiempo de recuperación de 135 nanosegundos y capaz de aguantar tensiones de 600 V cumple con las especificaciones del circuito [28]. Cuando se conmuta la válvula, surge un transitorio de corriente que supera el valor de consumo nominal de esta durante unos pocos instantes de tiempo. Para entregar esta corriente rápidamente se coloca un condensador que sea capaz de almacenar mucha energía (Alta capacidad) en paralelo con la fuente de alimentación. Estos transitorios pueden ocasionar daños en la alimentación, los condensadores se encargan de entregarlos, preservando la integridad del sistema.

Este diseño no solo es efectivo para controlar las válvulas manejando altas corrientes con una señal de bajo voltaje del microcontrolador, sino que también proporciona una protección integral para los componentes del circuito, asegurando un funcionamiento fiable y eficiente. Además, con la introducción del driver, es posible colocar otros MOSFET de carácter general, haciendo el diseño más versátil.

### 5.2.1.3 Ventilador

En el sistema el caudal de aire introducido a la PEMFC se puede aumentar utilizando el ventilador que incorpora la misma. De la misma manera que con las válvulas solenoides, para manejar la potencia que consume el ventilador, se utilizará un driver y un MOSFET. Al contrario del control tipo todo o nada aplicado a las válvulas, para el ventilador se utilizará un control PWM, de esta manera es posible variar la velocidad de este y controlar el caudal con más precisión. Para la generación de esta señal PWM de control se utiliza un timer del microcontrolador y una salida PWM.

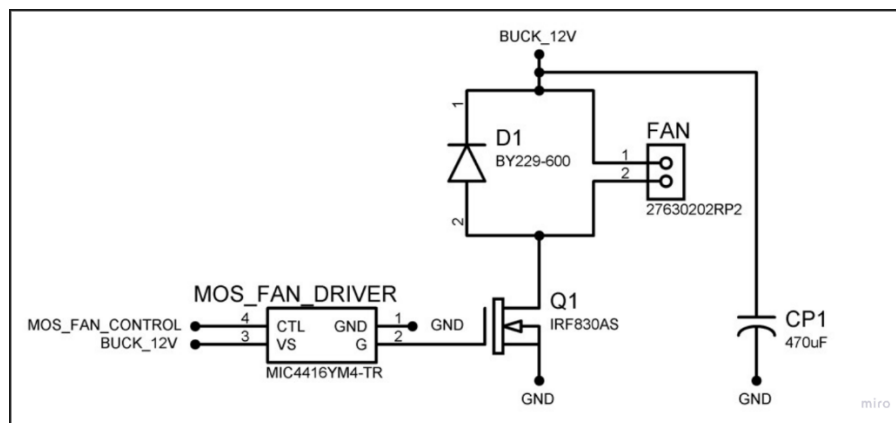


Figura 31. Etapa de potencia para el ventilador con control PWM.

Para esta etapa se utiliza exactamente el mismo esquema utilizado para manejar las válvulas, incluyendo también el diodo en antiparalelo con el ventilador y el condensador en paralelo con la alimentación. La única diferencia está en la señal que se coloca en la entrada de control del driver y por tanto en la puerta del transistor.

## CAPÍTULO 6. DISEÑO DEL SOFTWARE

El STM32F412ZG es un microcontrolador basado en una CPU, por lo que trabaja de manera secuencial, instrucción a instrucción. Esta metodología de ejecución exige tener un control sobre los tiempos de ejecución para cada proceso del sistema digital.

## 6.1 LECTURA DE LAS SEÑALES DE ENTRADA

El ADC del sistema es de tipo aproximaciones sucesivas. Este tipo de ADCs convierten una señal analógica a un valor digital en dos etapas. En primer lugar, se realiza el muestreo de la señal, conocido como tiempo de muestreo. Durante este tiempo se cargan los condensadores de muestreo hasta contener toda la información del valor de entrada en el canal del ADC. Una vez termina el tiempo de muestreo comienza el tiempo de conversión. En esta segunda etapa el ADC convierte los valores de voltaje a un valor digital y lo almacena en los registros del ADC. Estos dos procesos se realizan de manera secuencial para cada canal. De esta manera para calcular el tiempo total que se tarda en convertir todos los canales se han de sumar los tiempos de muestreo y conversión y multiplicarlos por el número de canales como se observa en ( 11 ).

La medida de estos tiempos es configurable en unidades de ciclo del reloj del ADC. Cada ciclo de reloj depende de la frecuencia del reloj del ADC. A su vez, la frecuencia del reloj del ADC es la frecuencia de reloj del microprocesador dividida por un valor de escalado. Este valor de escalado es configurable por el usuario, de esta manera reduciendo la frecuencia del reloj del ADC. Se obtiene cuanto tarda cada ciclo de reloj del ADC ( 10 ).

$$f_{ADC} = \frac{PCLK2}{ADC_{preescaler}} = \frac{72 \text{ MHz}}{2} = 36 \text{ MHz} ; ADC_{cycle} = \frac{1}{f_{ADC}} \approx 28 \text{ ns} \quad (10)$$

El tiempo de muestreo es un parámetro del sistema y es modificable e independiente para cada canal. La elección de este tiempo es crucial, un tiempo de muestreo demasiado corto no daría tiempo a que los condensadores de muestreo se cargasen o descargasen antes de iniciar la siguiente conversión, originando medidas erróneas. En cambio, elegir un tiempo de muestreo excesivo introduce retardos en el sistema innecesarios que ralentizan la conversión de las entradas del sistema. El tiempo de conversión al valor digital es fijo y depende exclusivamente de los bits del ADC, en este caso al contar con un ADC de 12 bits el tiempo de conversión por canal es de 12 ciclos de reloj [22].

$$t_{ADC} = (T_{muestreo} + 12 * ADC_{cycle}) * n^{\circ} \text{ de Canales} \quad (11)$$

Por tanto, como se observa en la Figura 32 para una conversión completa de 16 canales, y un tiempo de muestreo de 112 ciclos de reloj se obtiene un tiempo total de conversión para todos los canales de 56 microsegundos.

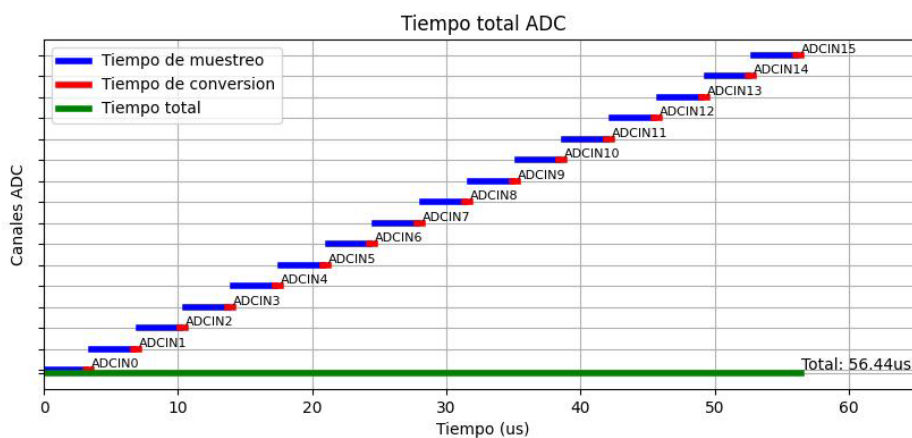


Figura 32. Ilustración de la conversión secuencial de los 16 canales del ADC

Este tiempo es lo que tarda el ADC desde que se le llama hasta que termina de convertir los voltajes en su entrada, escribirlos en los registros y grabarlos en la variable que se le pase en la



llamada. La manera de llamar al inicio de la conversión se realiza mediante un timer que genera el evento de disparo del ADC.

Los requisitos del sistema son medir todas las señales mínimo cada 20 milisegundos. Por lo que este timer se configura con un periodo de 1 milisegundo. De esta manera se asegura el fin de la conversión antes de la siguiente llamada y se cumple con el teorema de Nyquist, se sobrepasa estableciendo una frecuencia de muestreo de la señal 20 veces mayor (1 ms).

$$f_{nyquist} \geq 2 * f_{sistema} = 2 * \frac{1}{20 \text{ ms}} = 100 \text{ Hz}; T_{muestreo} \leq 10 \text{ ms} \quad (12)$$

## 6.2 PROMEDIADO DE LA CORRIENTE DE CONSUMO DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

Para establecer adecuadamente la señal de control del convertidor boost, es necesario calcular el valor medio de la corriente que consume el sistema de propulsión. De esta manera se evitan las caídas y subidas repentinas en la PEMFC, evitando los daños en el interior de esta.

Para calcular el valor medio de una señal se va a implementar el uso de un buffer de datos circular. Este buffer funciona con el método FIFO (first in first out, en inglés). En primer lugar, se establece el tamaño del buffer, este parámetro es la cantidad de muestras que se tendrán en cuenta a la hora de calcular el valor medio.

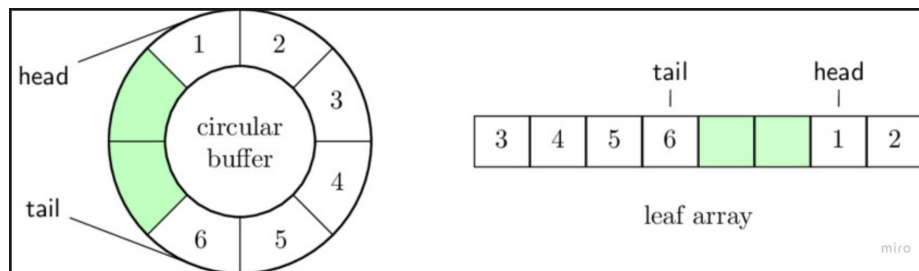


Figura 33. Representación gráfica para un buffer circular.

Como se ve en la Figura 33, el sistema va almacenando datos en el buffer recorriéndolo desde el principio, hasta que llega a la última posición. Cuando escribe sobre la última posición, retorna al principio del buffer para escribir el siguiente valor, borrando el valor más antiguo. De esta manera el promediado siempre se obtiene de las últimas muestras tomadas por el ADC, encargado de leer estos valores.

Para calcular el tamaño del buffer hay que tener dos cosas en cuenta, el periodo del que se calcula el valor medio y cada cuando el ADC lee un nuevo valor. Como se ha visto en el cálculo del tiempo de conversión, el ADC es llamado cada 1 ms por lo que se añadirá una muestra nueva al buffer cada 1 milisegundo. Para calcular el número de muestras se sigue la .

$$n_{muestras} = \frac{\text{periodo}}{\text{tiempo hasta nueva muestra}} = \frac{1 \text{ s}}{1 \text{ ms}} = 1000 \text{ muestras} \quad (13)$$

## 6.3 DISEÑO DE LAS MÁQUINAS DE ESTADOS

Para el sistema híbrido de pila de combustible-batería para un dron, se ha de controlar el funcionamiento de tres bloques principales:

- El conjunto de batería LiPo, su sensor de temperatura y el convertidor boost.



- El sensor de temperatura de la PEMFC y el ventilador que refrigera e introduce caudal de aire al interior de esta.
- El sistema de la PEMFC con las válvulas y el sensor de temperatura.

Siguiendo esta estructura, se logra un diseño del sistema que es más modificable, sencillo y eficiente, facilitando futuras adaptaciones y mejoras. De esta manera se procede al diseño de las 3 máquinas de estados que gobernarán todo el sistema.

### 6.3.1 Máquina de estados batería LiPo

La batería del sistema se puede encontrar en 4 estados posibles. Cabe mencionar que en todos los estados la batería alimenta al sistema de control digital y a los sistemas de propulsión del dron.

1. *La batería no está siendo cargada por el convertidor boost.* En el estado S1, la batería perdiendo carga ya que está alimentando el sistema y no está recibiendo corriente desde el convertidor boost.
2. *La batería está desequilibrada.* En el estado S2, la batería se encuentra desequilibrada porque alguna de sus celdas está por encima o por debajo de los límites establecidos por el control digital. Por tanto, no está preparada para recibir corriente de carga desde el convertidor boost.
3. *La batería está cargando.* En el estado S3, la batería está equilibrada, su temperatura está lejos del máximo y el voltaje de la pila no llega al máximo, por tanto, puede recibir carga desde el convertidor DC/DC.
4. *La batería esta sobrecalentada.* La temperatura de la batería está por encima de los límites establecidos por el control digital, por tanto, no está preparada para recibir corriente de carga desde el convertidor boost.

Los eventos que pueden ocurrir durante el funcionamiento de la máquina de estados son los siguientes:

- *La carga de la batería cae por debajo del 90% de su carga máxima.* En este caso, si la batería se encuentra lista para ser cargada, se inicia la carga.
- *La carga de la batería llega al 98% de su carga máxima.* En este caso, es peligroso seguir cargando la batería LiPo. Se debe interrumpir la corriente de carga.
- *Alguna de las celdas se desequilibra, sube o baja de los límites de voltaje establecidos.* En este caso, la corriente de carga debe ser 0, es peligroso seguir cargando la batería.
- *Las celdas vuelven a estar en equilibrio.* En este caso, si la batería está preparada para recibir carga (Está dentro de los límites de temperatura y su carga no supera el 90%), se inicia la carga de la batería.
- *La batería se sobrecalienta.* En este caso, la batería está en peligro y se debe de interrumpir la corriente de carga.
- *La batería vuelve a la temperatura de trabajo.* En este caso, si la batería está preparada para recibir carga (Todas las celdas están equilibradas y la carga no supera el 90%), se inicia la carga de la batería.

Ante estos eventos del sistema las salidas posibles son iniciar la carga de la batería o interrumpirla.

Para iniciar la carga de la batería LiPo, la corriente entregada por el convertidor boost tiene que ser igual a la suma de la corriente media consumida por el sistema de propulsión, el control digital y las etapas de potencia formadas por del ventilador y las válvulas más un valor de corriente adicional que se introduzca en la batería, siguiendo ( 14 ).

$$I_C = I_{P(AV)} + I_{digital} + I_{potencia} + 1 A \quad (14)$$

Para interrumpir la carga de la batería LiPo, la corriente entregada por el convertidor boost debe seguir ( 15 ).

$$I_C = I_{P(AV)} + I_{digital} + I_{potencia} \quad (15)$$

Siguiendo la estructuración de los estados S1 a S4, los posibles eventos de la MEF y las salidas se origina la Tabla 8.

ESTADO ACTUAL	DESCRIPCIÓN DEL ESTADO	EVENTOS	ESTADO SIGUIENTE	ACCIONES
S1	LiPo NO cargando	V_BAT < 0.90 V_BATmax (La carga de la LiPo cae por debajo del threshold)	S3	$I_c = I_p(AVG) + c \cdot A$ (La corriente de carga es igual a la media de consumo más una constante)
		V_CELLx está desequilibrada	S2	$I_c = I_p(AVG)$ (La corriente de carga es igual a la media de consumo)
S2	LiPo desequilibrada	TODAS las V_CELL están equilibradas	S1	$I_c = I_p(AVG)$ (La corriente de carga es igual a la media de consumo)
S3	LiPo cargando	V_CELLx está desequilibrada	S2	$I_c = I_p(AVG)$ (La corriente de carga es igual a la media de consumo)
		V_BAT > 0.99 V_BATmax (La LiPo está cargada hasta un threshold)	S1	$I_c = I_p(AVG)$ (La corriente de carga es igual a la media de consumo)
		TEMPbat > Threshold °C (La LiPo se sobrecalienta)	S4	$I_c = I_p(AVG)$ (La corriente de carga es igual a la media de consumo)
S4	LiPo por encima de la temperatura recomendada	TEMPbat < Threshold °C (La temperatura de la LiPo baja por debajo de un threshold)	S2	$I_c = I_p(AVG)$ (La corriente de carga es igual a la media de consumo)

Tabla 8. Estados, eventos y transiciones para la MEF que gobierna el convertidor DC/DC

### 6.3.2 Máquina de estados del ventilador

El ventilador del sistema se puede encontrar en 3 estados posibles:

1. *La PEMFC está parada.* En el estado S1, el ventilador no está en marcha y está listo para arrancar.
2. *La PEMFC está en modo normal.* En el estado S2, la PEMFC está en funcionamiento normal, esto significa que su temperatura es baja (menor de 50 grados Celsius). En este estado se proporciona el mínimo caudal de aire para que reaccione todo el hidrógeno de las celdas. De esta manera se minimiza la refrigeración cuando no es requerida y por tanto el consumo del ventilador.
3. *La PEMFC está en alta temperatura.* En el estado S3, la PEMFC se encuentra por encima de 50 grados Celsius. Es en este estado cuando el ventilador cumple sus dos misiones, refrigerar y proporcionar caudal de aire para la reacción. Establece su velocidad en

función de la temperatura de la PEMFC y de la cantidad de oxígeno necesaria según la corriente.

Los eventos que pueden ocurrir durante el funcionamiento de la máquina de estados son los siguientes:

- *La PEMFC se enciende.* En este caso, el ventilador debe encenderse inmediatamente para proporcionar oxígeno a las celdas.
- *La PEMFC se apaga.* En este caso, el ventilador debe apagarse para no derrochar energía eléctrica.
- *La PEMFC sobrepasa los 50 grados.* En este caso, la batería está dentro del rango de trabajo por lo que necesita refrigeración, el caudal debe de aumentar.
- *La PEMFC baja de los 40 grados.* En este caso, no necesita refrigeración, el caudal debe de disminuir. Siempre proporcionando al menos el doble de los gases necesarios para la reacción completa.

Ante estos eventos del sistema las salidas posibles son parar el ventilador, establecer el caudal mínimo que asegure la reacción de todo el combustible y establecer un caudal que asegure la refrigeración y la reacción de todo el combustible. Para controlar el caudal la única señal que interactúa es la de control PWM del ventilador, para modificar el caudal se modula el ciclo de trabajo.

Se establece que el mínimo caudal del ventilador es con el ciclo de trabajo al 60%, del 60 al 80% varía en función de la corriente solicitada. Finalmente, si la pila necesita refrigeración, el ciclo de trabajo y por tanto el caudal debe ser máximo. Para estos estados, transiciones y salidas se origina la Tabla 9.

ESTADO ACTUAL	DESCRIPCIÓN DEL ESTADO	EVENTOS	ESTADO SIGUIENTE	ACCIONES
S1	PEMFC parada	La PEMFC se enciende	S2	CT = 60% + corriente * 20%
S2	PEMFC en modo normal, caudal para asegurar una reacción con la corriente máxima de salida del convertidor boost	La PEMFC se apaga	S1	CT = 0%
		T_PEMFC > 50 °C	S3	CT = 100%
S3	PEMFC temperatura alta	La PEMFC se apaga	S1	CT = 0%
		T_PEMFC < 40 °C	S2	CT = 60% + corriente * 20%

Tabla 9. Estados, eventos y transiciones para la MEF que gobierna el ventilador

### 6.3.3 Máquina de estados PEMFC

La PEMFC se puede encontrar en 3 estados posibles. En función de estos estados, se deben manejar las válvulas y mandar señales a la MEF del ventilador.

1. *La PEMFC está parada.* En el estado S1, el sistema está en reposo y por tanto la PEMFC está parada, preparada para recibir la señal de arranque.
2. *La PEMFC está en funcionamiento normal.* En el estado S2, el stack opera con normalidad, preparado para purgar las impurezas si es necesario.



3. *La PEMFC está en modo de purgado de impurezas.* En el estado S3, la válvula de purgado está abierta para limpiar las impurezas.
4. *La PEMFC está sobrecalentada.* Ha superado la temperatura de seguridad, es necesario pararla para que se refrigere.

Los eventos que pueden ocurrir durante el funcionamiento de la máquina de estados son los siguientes:

- *Arranque del sistema híbrido.* En este caso, se debe encender el ventilador y se debe abrir la válvula principal para que entre el hidrógeno a las celdas. Para que el hidrógeno llene las celdas y saque el aire ambiente se ha de iniciar la secuencia de purgado de arranque.
- *El sistema híbrido entra en parada.* En este caso es indispensable cerrar la válvula principal, cortando el paso de combustible. También es necesario apagar el ventilador para no derrochar energía eléctrica.
- *El voltaje de la última celda cae por debajo del umbral.* En este caso, la PEMFC presenta impurezas en su interior, se abre la válvula de purgado para limpiarlas.
- *El tiempo de purgado ha terminado.* En este caso, se debe de cerrar la válvula de purgado ya que no es seguro ni eficiente mantenerla abierta.
- *La temperatura de la PEMFC sube de la máxima recomendada.* Por seguridad, hay que detener el balance de planta de la PEMFC.
- *La temperatura de la PEMFC vuelve a un estado normal.* Si vuelve a estar en temperaturas aceptables, se inicia de nuevo el balance de planta.

Ante estos eventos del sistema las salidas posibles son:

- *Arrancar o parar el ventilador.* Mediante una señal de control se avisa a la MEF del ventilador de que la PEMFC ha arrancado o ha parado.
- *Abrir o cerrar la válvula principal.* La señal de control del MOSFET que controla la válvula principal tiene que estar a nivel alto para abrirla y a nivel bajo para cerrarla.
- *Abrir o cerrar la válvula de purgado.* La señal de control del MOSFET que controla la válvula de purgado tiene que estar a nivel alto para abrirla y a nivel bajo para cerrarla.

Siguiendo la estructuración de los estados S1 a S4, los posibles eventos de la MEF y las salidas se origina la Tabla 10.

ESTADO ACTUAL	DESCRIPCIÓN DEL ESTADO	EVENTOS	ESTADO SIGUIENTE	ACCIONES
S1	PEMFC parada	Arranque del sistema híbrido	S3	MAIN VALVE ON VENTILADOR ON VÁLVULA PURGADO ON
S2	PEMFC en funcionamiento normal	V_PEMFC2 incorrecto (la ultima celda no es eficiente)	S3	INICIO TIMER PURGADO VÁLVULA PURGADO ON
		Paro del sistema híbrido	S1	MAIN VALVE OFF VENTILADOR OFF
		Se sobrecalienta la PEMFC (+ 65 °C)	S4	MAIN VALVE OFF
S3	PEMFC en modo purgado por impurezas	timer_purgado END	S2	VÁLVULA PURGADO OFF
S4	PEMFC sobrecalentada	La temperatura de la PEMFC baja de 60 °C	S3	MAIN VALVE ON VENTILADOR ON ABRIR VÁLVULA PURGADO

Tabla 10. Estados, eventos y transiciones para la MEF que gobierna la PEMFC.

## CAPÍTULO 7. TESTEO DE LOS SUBSISTEMAS DEL SISTEMA DE CONTROL DIGITAL

Para validar el diseño de los componentes elegidos y los circuitos de acondicionamiento y control de señales se procede a testear los siguientes subsistemas para comprobar que cumplen con los requisitos establecidos para el diseño.

### 7.1 DIVISORES DE TENSIÓN PARA LA PEMFC Y LA BATERÍA

Para las 12 señales de voltaje de la batería LiPo y las dos de la PEMFC se ha utilizado el mismo diseño con cambios en la resistencia R1 de la Figura 20 según los rangos de voltaje de entrada a cada divisor.

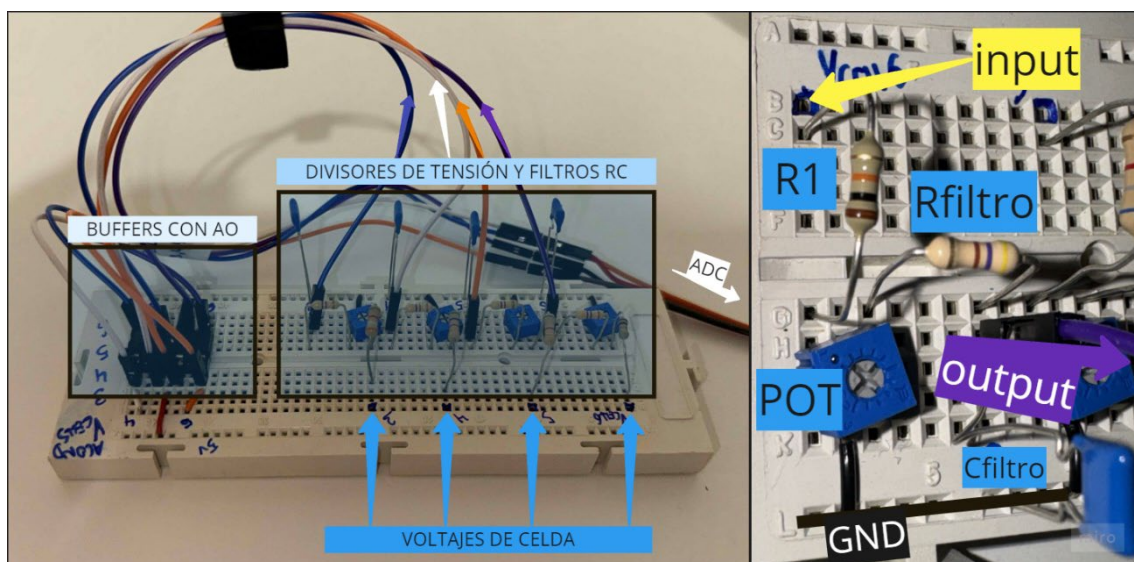


Figura 34. Izquierda: Montaje circuito acondicionamiento celdas LiPo y PEMFC. Derecha: Detalle del divisor de tensión y el filtro RC paso-bajo.

Se ha testado para 4 entradas ya que la única diferencia entre los circuitos es el valor de la resistencia R1. Como se indica en el anexo de cálculos teóricos, todas las señales de voltaje tienen un rango de entrada de 0.459 V con un offset de 2 V. Para ajustar el error de offset por las tolerancias de las resistencias se utiliza POT. El diseño testado es el de la celda 6 de la batería LiPo.



- Se testea mediante la fuente de alimentación que actuará con los voltajes mínimo, nominal y máximo de celda.
- Se mide el voltaje de la fuente de alimentación, el voltaje a la entrada del ADC, y el voltaje medido por el sistema de control digital.

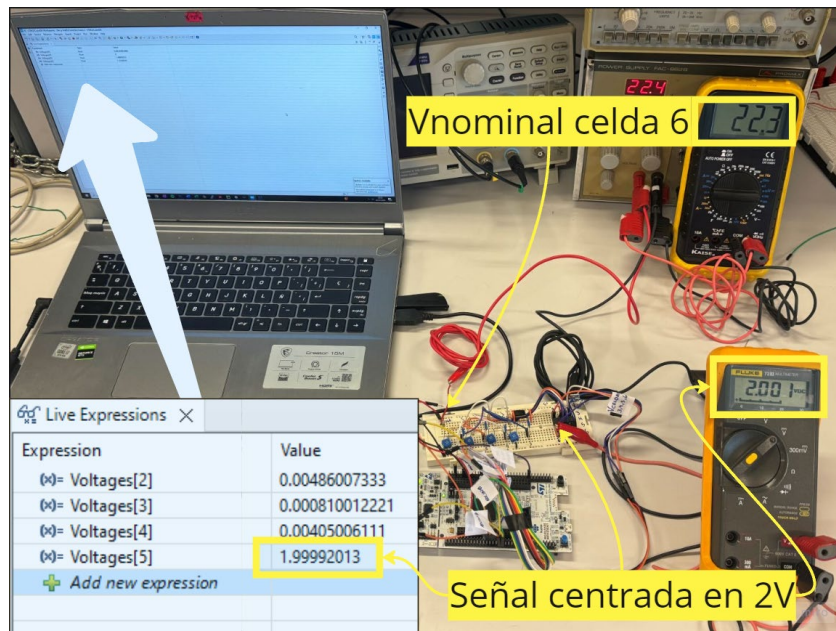


Figura 35. Medición de salida para voltaje nominal en la etapa de acondicionamiento para la celda 6 de la batería LiPo

De la Figura 35, cabe destacar que el valor 5 del vector *Voltages* se debe a que la celda 6 está conectada al canal 5 del ADC. Según el anexo de cálculos teóricos para el voltaje de celda mínimo de 19.8 V hay que medir 1.78 V en el control digital. Para el máximo de 24.9 V hay que medir 2.24 en el control digital.

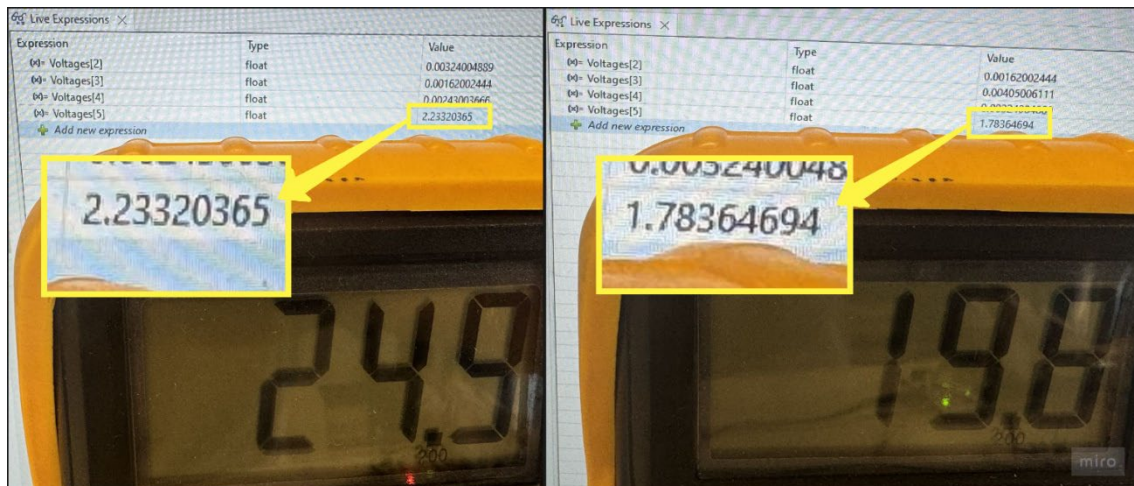


Figura 36. Voltajes en el sistema digital para los valores de celda (Celda 6 LiPo-9 máximo y mínimo).

Como se observa, después del ajuste con el potenciómetro no hay error en la señal. Se da por validado el sistema de acondicionamiento, filtrado y buffer de las tensiones la batería LiPo y la PEMFC.

## 7.2 ACONDICIONAMIENTO SENSORES DE CORRIENTE



Para las corrientes del sistema se ha diseñado un circuito capaz de filtrar la señal, aumentar la sensibilidad del sensor y ofrecer una salida de baja impedancia. Para testear el funcionamiento del circuito se ha probado para un sensor.

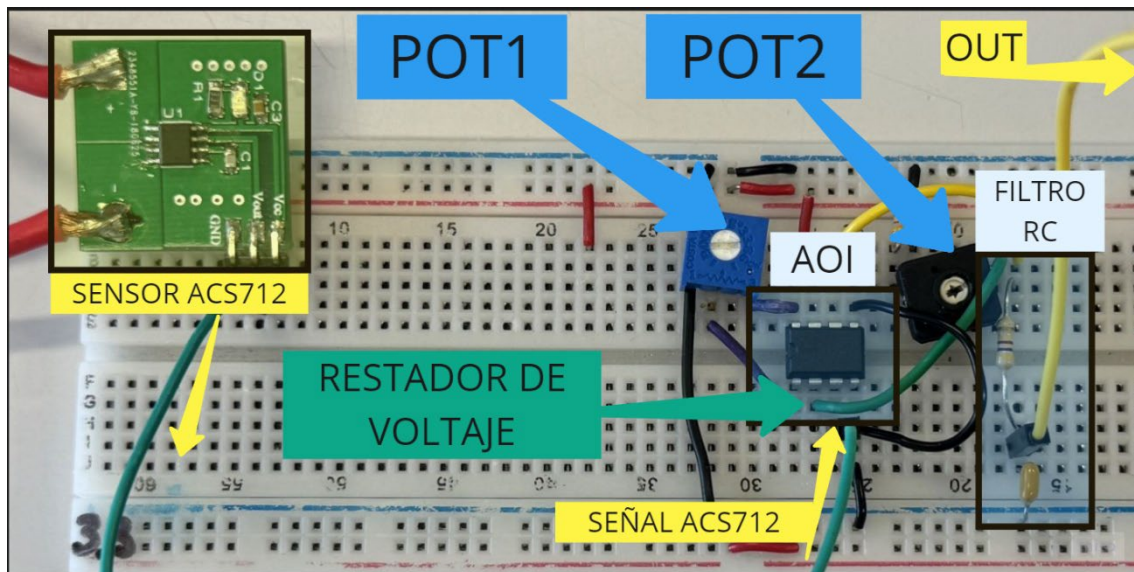


Figura 37. Montaje etapa acondicionamiento para el sensor ACS712.

Los potenciómetro POT1 y POT2 sirven para eliminar el error de offset por tolerancias a la salida de la etapa. POT1 sirve para regular la ganancia del AOI y POT2 regula el voltaje que se coloca en la entrada negativa (voltaje que restará el AOI) Se quiere comprobar que la sensibilidad del sensor son 100 mV/A y que además es capaz de medir varios amperios sin perder precisión.

- Se testea mediante una fuente de alimentación en cortocircuito, regulando la corriente que circula.
- Se mide la corriente que entrega la fuente con un multímetro para asegurar la precisión.
- Se compara la lectura del multímetro con la lectura de otro multímetro a la salida de la etapa de acondicionamiento del sensor.

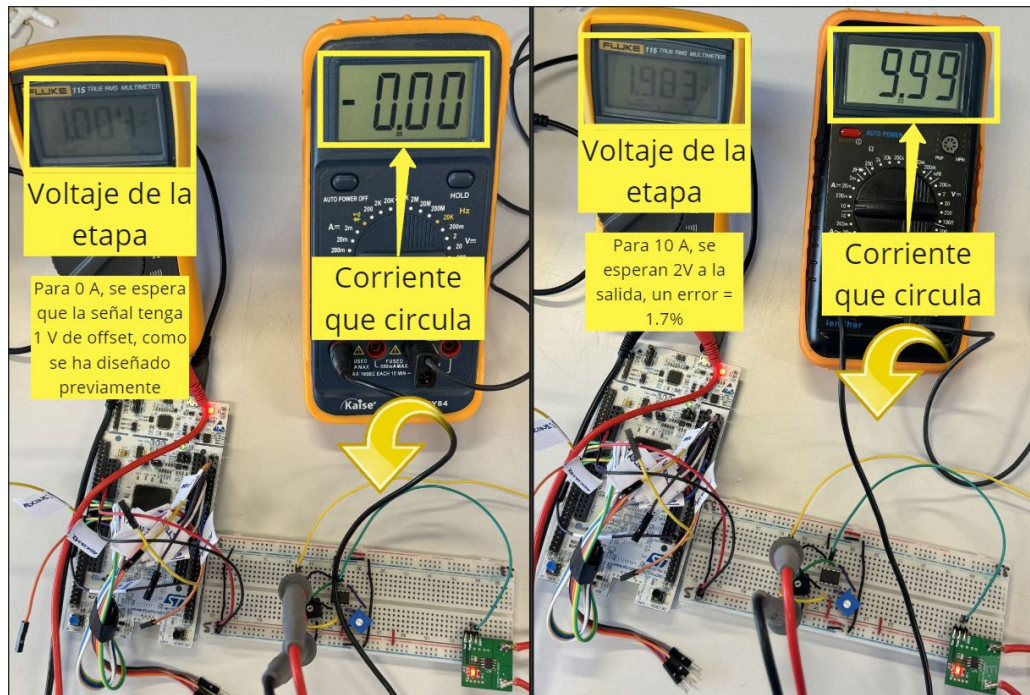


Figura 38. Medición del offset de la señal de la etapa de medida de corriente y comprobación de la linealidad de la salida.

Como se observa en la Figura 38, la salida del sensor es lineal y es capaz de medir corrientes altas de manera lineal. Se da por validada la etapa de acondicionamiento de la señal para los sensores de corriente.

### 7.3 ACONDICIONAMIENTO SENSORES DE TEMPERATURA

Para los sensores de temperatura se ha implementado la configuración con multiplexor de la Figura 25 con el objetivo de testear su funcionamiento. Aprovechando la velocidad del ADC y la capacidad de conmutación de los multiplexores se aprovecha al máximo el hardware disponible. El montaje de este circuito consiste en el de la Figura 39.

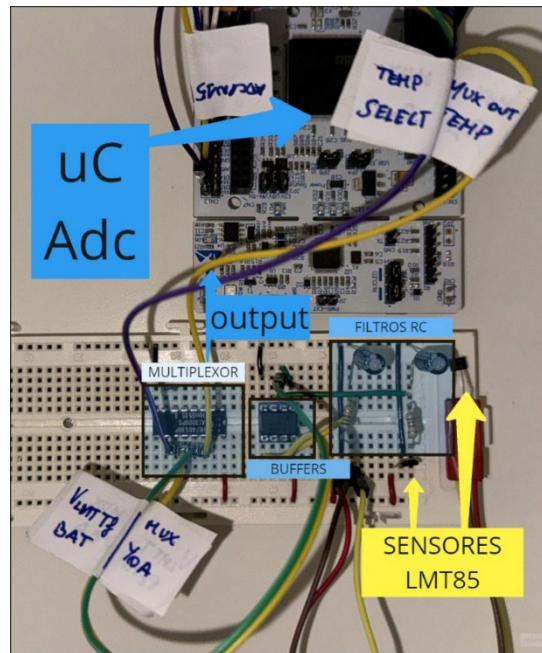


Figura 39. Acondicionamiento de los dos LMT85 formado por filtro paso bajo, buffers y multiplexor.

Se han obtenido medidas con el multímetro que validan el funcionamiento de los sensores y sus etapas de filtrado. Para testear este circuito de manera más exhaustiva y validar la medida de dos sensores con un solo ADC, se utilizará a continuación el capítulo del graficado en tiempo real.

#### 7.4 ETAPAS DE POTENCIA MOSFET Y CONVERTIDOR BUCK

El circuito de potencia de la Figura 31 para el ventilador, es físicamente igual que el de las válvulas solenoides. Por esta razón, se valida el circuito en la etapa de potencia del ventilador de la Figura 40.

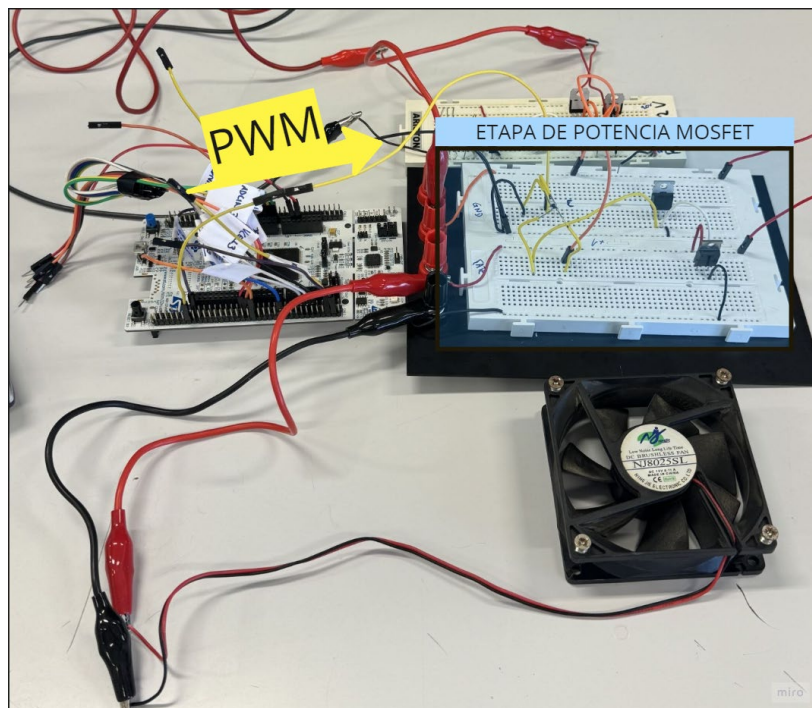


Figura 40. Montaje circuito de control PWM para el ventilador.



El montaje del convertidor Buck para reducir el voltaje de la batería LiPo también se prueba con la fuente del laboratorio en el circuito de la Figura 41.

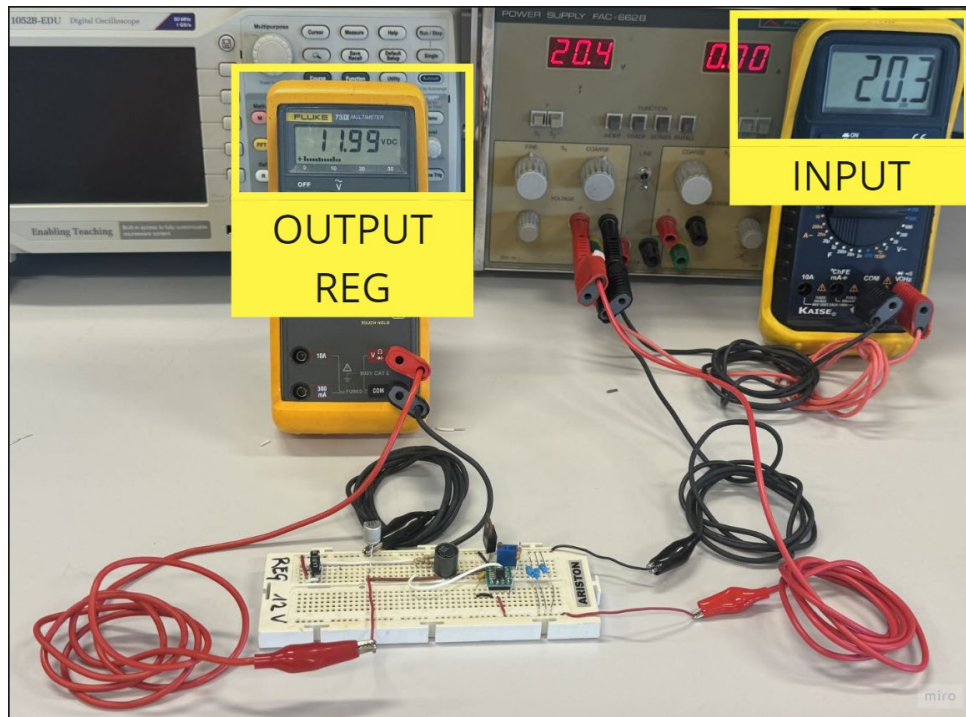


Figura 41. Montaje y validación para el regulador de voltaje conmutado.

## CAPÍTULO 8. GRAFICADO EN TIEMPO REAL DE LAS SEÑALES DEL SISTEMA

Uno de los objetivos del presente TFG es desarrollar un sistema que tenga la capacidad de monitorizar los datos del sistema en tiempo real. Significa un gran avance poder analizar el comportamiento de los distintos elementos en los ensayos realizados.

A la hora de realizar un ensayo es muy importante obtener un feedback hacia el investigador que valide o rechace las hipótesis, ofrezca conclusiones, entre otros beneficios. El hecho de representar las señales gráficamente también ayuda a entender cómo evolucionan los sistemas en el tiempo, velocidades de actualización o respuesta ante distintas entradas.

### 8.1 PYTHON COMO HERRAMIENTA DE PLOT

El sistema está continuamente muestreando las señales de entrada, conteniendo su información y procesándola. Para mostrar la información de diversas formas en un portátil, hay que enviar los datos periódicamente. El microcontrolador debe transmitir por comunicación UART información al PC por el puerto serie. Para este propósito se utiliza la placa de desarrollo de la Figura 18 y la comunicación del microcontrolador. Para convertir los niveles de voltaje de UART a protocolo USB y ganar robustez en la transmisión se opta por introducir la placa fabricada por Spark Fun.

Una vez estamos transmitiendo en forma de cadena de texto los datos al ordenador por el puerto serie es necesario procesarlos. Normalmente se recibirán varios datos en serie en forma de cadena de texto, a la llegada se han de seguir los siguientes pasos:

1. Lectura del puerto serie

2. Decodificación de la información
3. Separación de variables
4. Conversión a datos numéricos
5. Almacenado en variables para su posterior representación

Se puede observar la consecución de los siguientes pasos de código en el Anexo III. Una vez seguidos estos pasos y mediante el uso de librerías que facilitan el graficado se obtienen resultados como los de la Figura 42 por tanto validando la herramienta de graficado en tiempo real.

Es una herramienta muy flexible que permite modificar el número de señales, el número de señales por gráfica, distintos formatos de representación, entre otros muchos cambios.

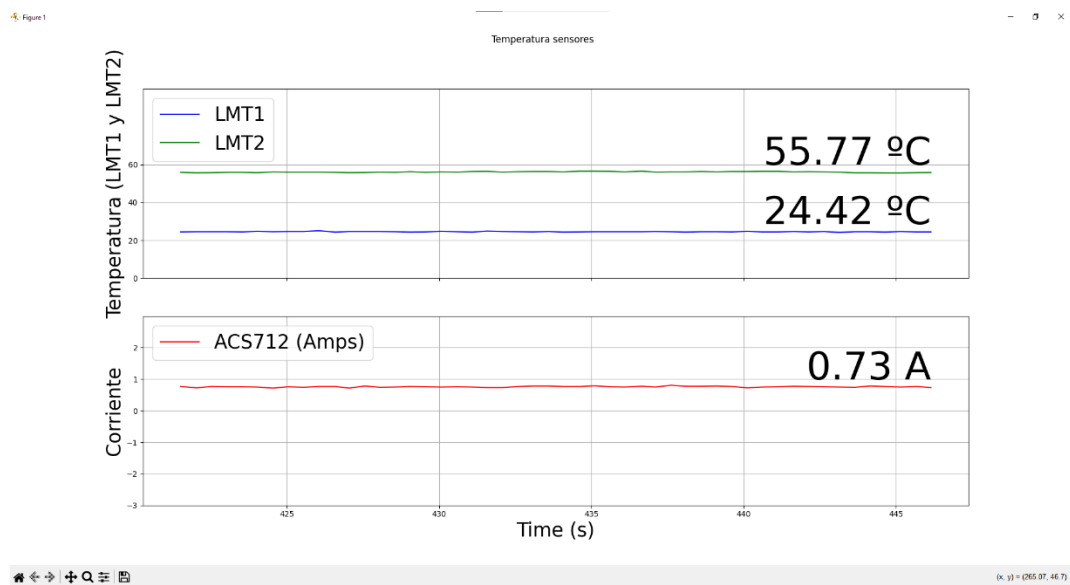


Figura 42. Gráficas generadas en Python para dos sensores de corriente y uno de temperatura.

Si bien es cierto, presenta ciertas limitaciones. El graficado de funciones es costoso para un ordenador en términos de número de instrucciones. Esto ocasiona que la velocidad de representación sea del orden de cientos de milisegundos. Aun así, en tiempo real no será interesante observar cambios más rápidos ya que no son visibles por el humano.

## 8.2 RESULTADOS DEL GRAFICADO EN TIEMPO REAL

Para validar la aplicación de representación de las señales del sistema se utilizan las señales de temperatura de ambos sensores y además la de un sensor de corriente del sistema. Para realizar el test se hace lo siguiente:

- Es necesario recordar que las señales de temperatura llegan al microcontrolador a través de una única entrada al ADC, por lo que se validará también esa arquitectura.
- Para hacer una diferenciación clara de ambos sensores de temperatura uno se coloca a temperatura ambiente y el otro se coloca en la salida del ventilador del portátil del alumno.

- Primero se testea el sistema para corriente 0 en la Figura 43. Los cables del sensor de corriente están al aire. Posteriormente en la misma figura se hace pasar una corriente por el sensor para ver si el sistema reacciona.

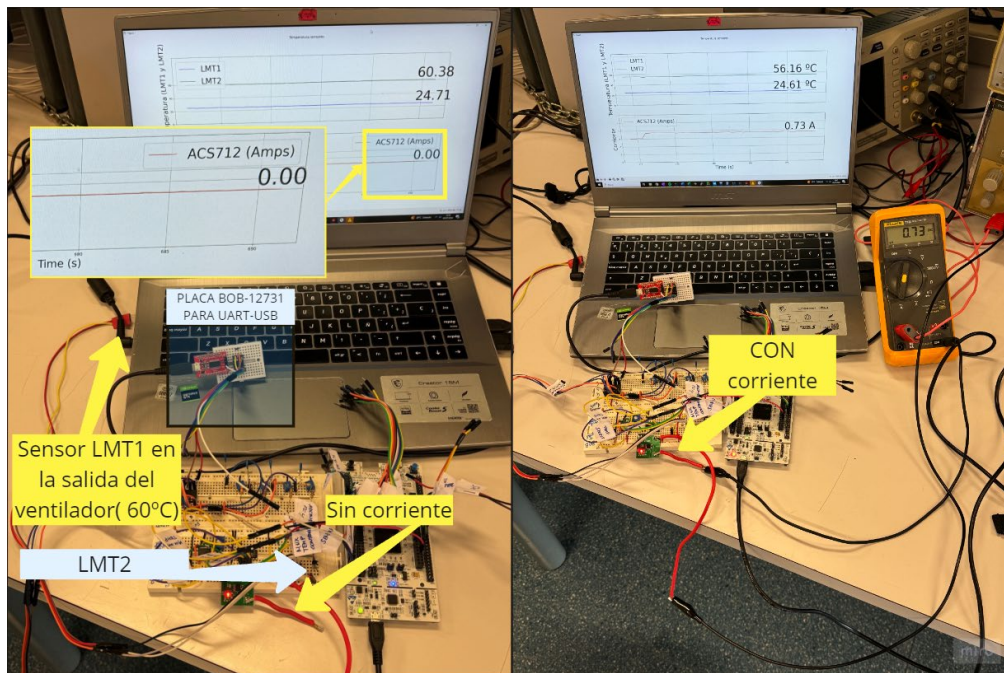


Figura 43. Gráficas corriente y temperatura con Python en tiempo real.

Cabe destacar que, durante el test, las velocidades de reacción a los cambios son instantáneas para la percepción de un humano. Una vez presentada la herramienta queda darle uso de manera que aporte riqueza a los ensayos futuros para el sistema híbrido pila de combustible-batería.

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras la realización del presente TFG se propone continuar el proyecto a partir de los siguientes puntos:

- Implementación de la máquina de estados definida en el actual TFG.
- Diseño de una placa de circuito impreso que incluya todos los componentes.
- Uso de la H100 para validar el sistema de carga de la batería LiPo.

Después de realizar el diseño y modelado del sistema se han testado por separado los subconjuntos del control digital. Validando cada uno de ellos para su posterior implementación conjunta.

El diseño del software en Python para el análisis del comportamiento en tiempo real ha sido validado también y presenta grandes oportunidades para la realización de ensayos. Con el deseo de cursar el Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Electrónicos en la UPV a partir de septiembre del presente año se continuará con el desarrollo del proyecto y colaboración con las labores de investigación del equipo H2Drone.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Marqués, Á. Montero, C. Sánchez-Díaz, y I. Quintanilla, «Design methodology and simulation analysis of hybrid fuel cell and battery systems for powering unmanned aircraft systems», *Energy Convers Manag*, vol. 306, p. 118303, abr. 2024, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2024.118303.
- [2] Bowen Zhang, Zaixin Song, Fei Zhao, y Chunhua Liu, «Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles», *Energies (Basel)*, vol. 15, n.º 2, 2022.
- [3] J. Farinha, L. M. Silva, J. Matlock, F. Afonso, y A. Suleman, «Hydrogen fuel cell integration and testing in a hybrid-electric propulsion rig», *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, n.º 97, pp. 38473-38483, dic. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.06.090.
- [4] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, y C. Chen, «Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery», *J Power Sources*, vol. 208, pp. 210-224, jun. 2012, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2012.02.038.
- [5] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, y G. Yushin, «Li-ion battery materials: present and future», *Materials Today*, vol. 18, n.º 5, pp. 252-264, jun. 2015, doi: 10.1016/J.MATTOD.2014.10.040.
- [6] M. H. McCay y S. Shafiee, «Hydrogen: An Energy Carrier», *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*, pp. 475-493, ene. 2020, doi: 10.1016/B978-0-08-102886-5.00022-0.
- [7] Y. Bicer y I. Dincer, «Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation», *Int J Hydrogen Energy*, vol. 43, n.º 9, pp. 4583-4596, mar. 2018, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2017.07.110.
- [8] O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson, y S. Few, «Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study», *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, n.º 52, pp. 30470-30492, dic. 2017, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2017.10.045.
- [9] Argentina Gob, «Hidrógeno y transición energética», <https://www.argentina.gob.ar/asuntos-estrategicos/estrategia-nacional-para-el-desarrollo-de-la-economia-del-hidrogeno/hidrogeno-y>.
- [10] S. Verhelst y T. Wallner, «Hydrogen-fueled internal combustion engines», *Prog Energy Combust Sci*, vol. 35, n.º 6, pp. 490-527, dic. 2009, doi: 10.1016/J.PECS.2009.08.001.
- [11] N. A. A. Qasem, «A recent overview of proton exchange membrane fuel cells: Fundamentals, applications, and advances», *Appl Therm Eng*, vol. 252, p. 123746, sep. 2024, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.123746.
- [12] Jundika C. Kurnia, Benitta Chaedir, A.P. Sasmito, y Tariq Shamim, «Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions», *Appl Energy*, vol. 283, n.º 116359, 2020.
- [13] H. TOOLS, «¿Qué es la válvula solenoide?», <https://hntools.es/ayuda-y-consejos/valvula-solenoide/>.
- [14] Texas Instruments, «LMT85 1.8-V, SC70/TO-92/TO-92S, Analog Temperature Sensors», <https://www.ti.com/lit/gpn/lmt85>.
- [15] Wang Ruifeng y Mi Gensuo, «Application of hall sensors in direct current detection», *Chinese Journal of Scientific Instrument*, vol. 27, pp. 312-313, 2006.
- [16] Allegro Microsystems, «Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor», <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.pdf>.





- [17] J. Muñoz Pérez, «Monitorización del consumo de un drone cuadracóptero», UPV, 2019.
- [18] STMicroelectronics, «Positive voltage regulator ICs», <https://www.st.com/resource/en/datasheet/178.pdf>.
- [19] Microchip, «8/10/12-Bit Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface», <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/22248a.pdf>.
- [20] FTDI Chip, «FT232R USB UART IC Datasheet», [https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS\\_FT232R.pdf](https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf).
- [21] NCPower, «BMS en baterías de litio: qué es y función en el balanceo de celdas», <https://ncpower.es/bms-en-baterias-de-litio-que-es-y-funcion-en-el-balanceo-de-celdas/>.
- [22] STMicroelectronics, «Arm®-Cortex®-M4 32b MCU+FPU, 125 DMIPS, 1MB Flash, 256KB RAM, USB OTG FS, 17 TIMs, 1 ADC, 17 comm. interfaces», <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f412zg.pdf>.
- [23] Lei Li, YangZhen Chen, huaping Zhou, hongxu Ma, y Jianping Liu, «The application of hall sensors ACS712 in the protection circuit of controller for humanoid robots », en *International Conference on Computer Application and System Modeling*, Taiyuan, 2010.
- [24] Analog Devices, «Single and Dual-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier», <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ad623.pdf>.
- [25] Nexperia, «74LVC1G3157-Q100 2-channel analog multiplexer/demultiplexer», [https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74LVC1G3157\\_Q100.pdf](https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74LVC1G3157_Q100.pdf).
- [26] Carl, «Two Way Solenoid Valves», <https://solenoidvalvesupplier.com/two-way-solenoid-valves/>.
- [27] Microchip, «IttyBitty Low-Side MOSFET Driver», <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/MIC4416-7-IttyBitty-Low-Side-MOSFET-Driver-DS20006077A.pdf>.
- [28] Philips Semiconductors, «Rectifier diodes BY229F, BY229X series fast, soft-recovery», <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/97305/0/0/1/BY229-F-X-Series.pdf>.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

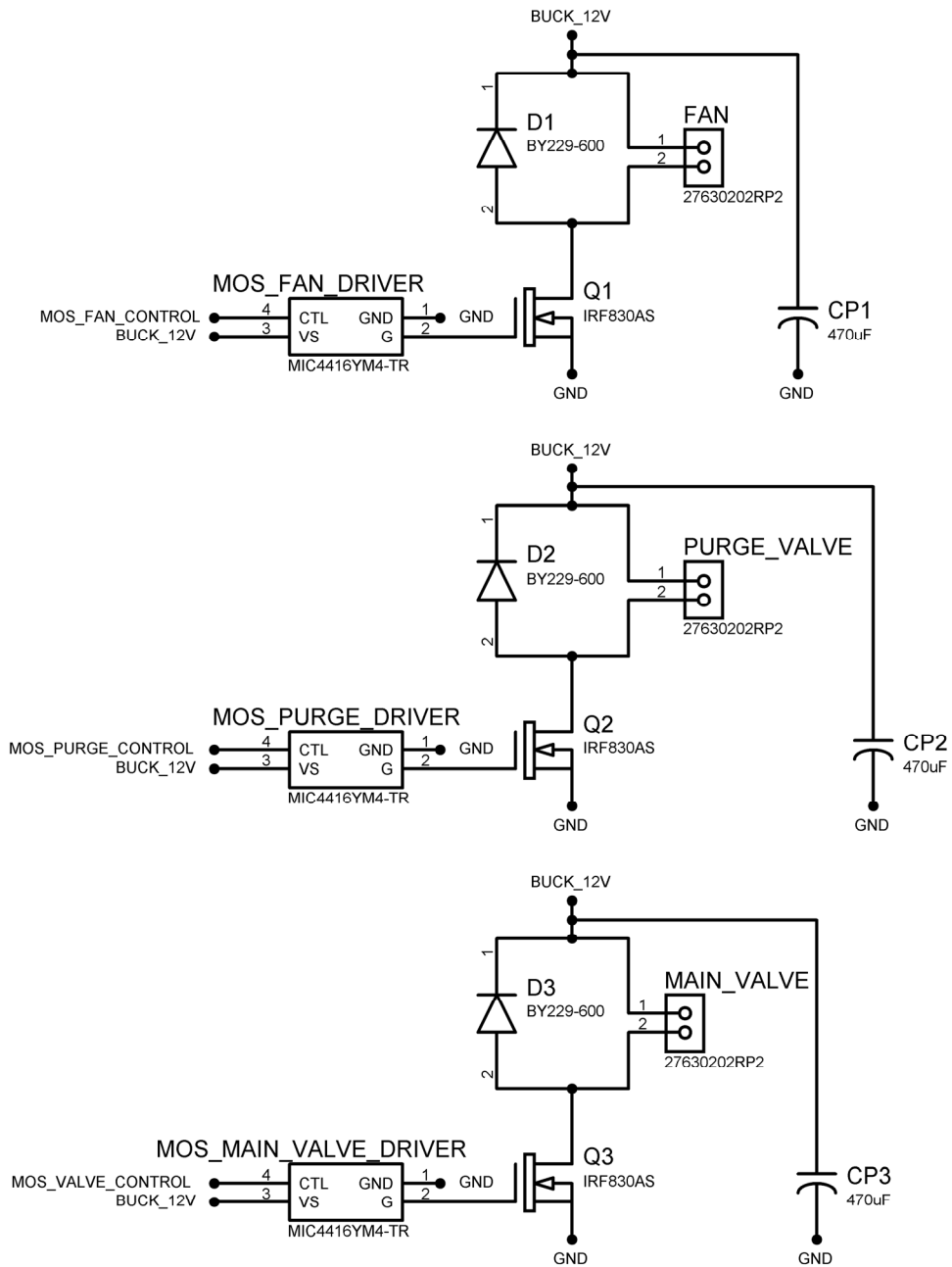
Control digital de la gestión de energía de un sistema  
híbrido pila de combustible-batería

Trabajo Fin de Grado

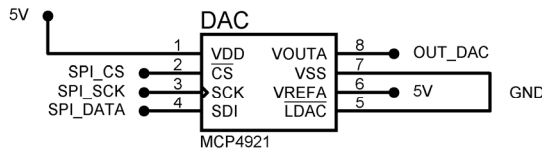
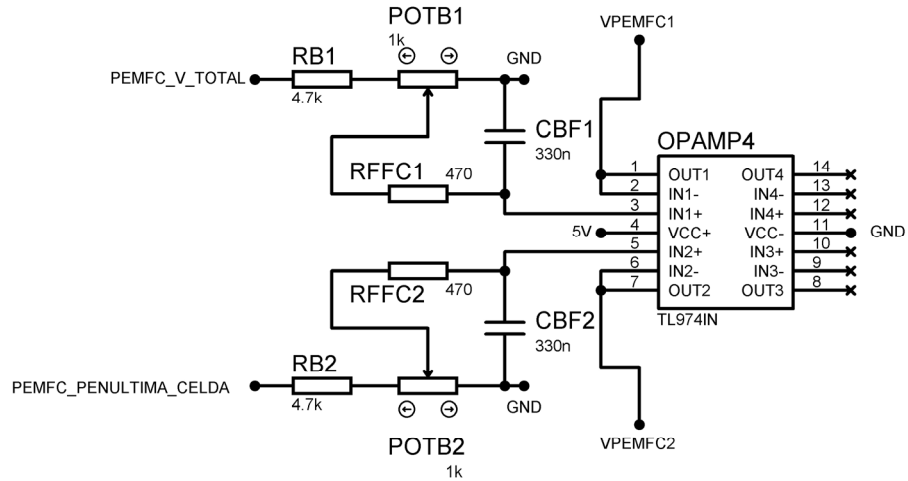
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

# PLANOS

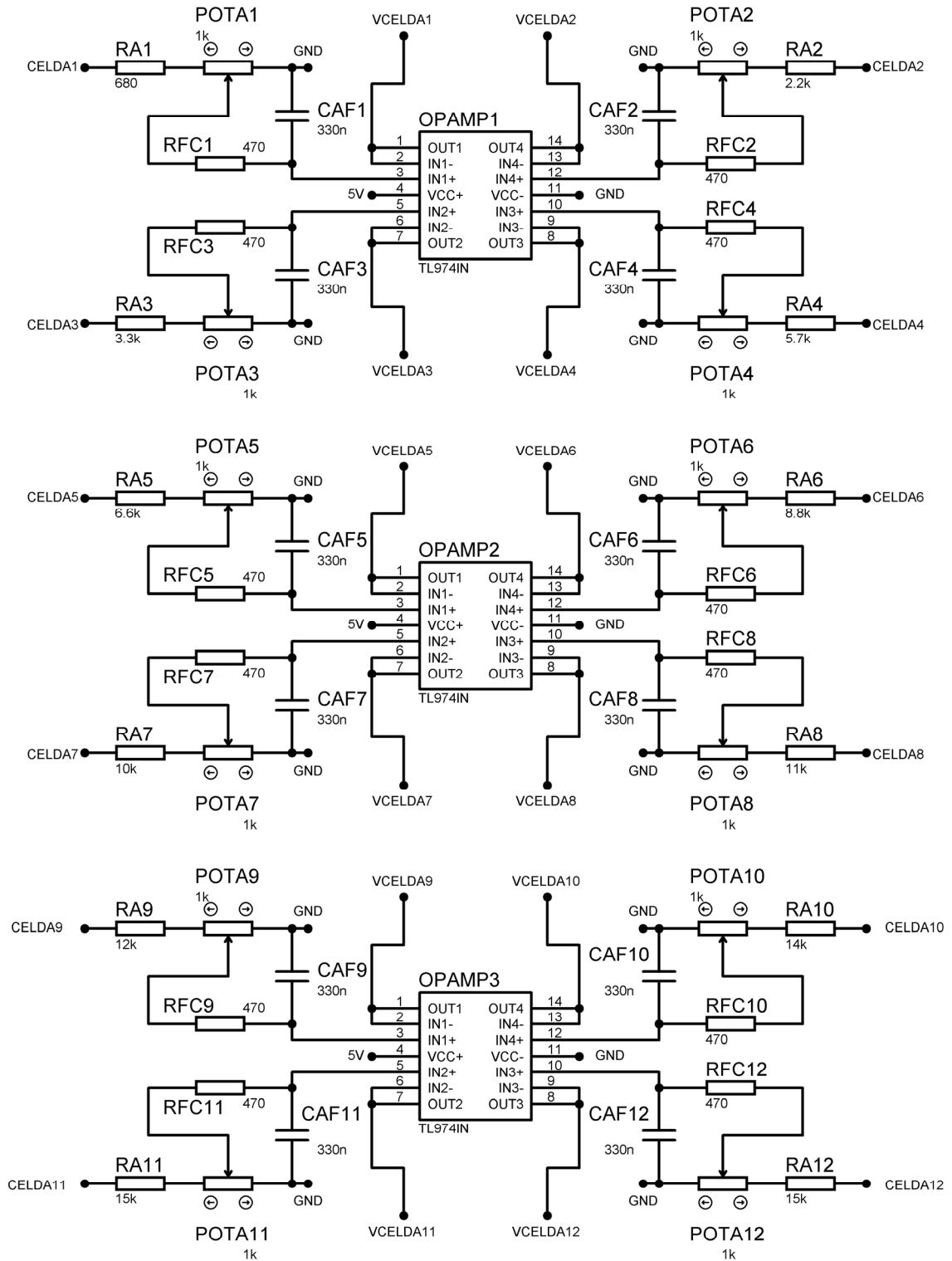
AUTOR/A: Cobelas Engel, Camilo Luca



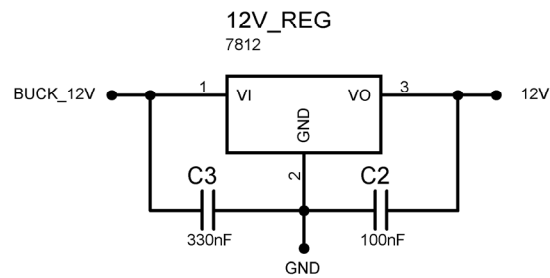
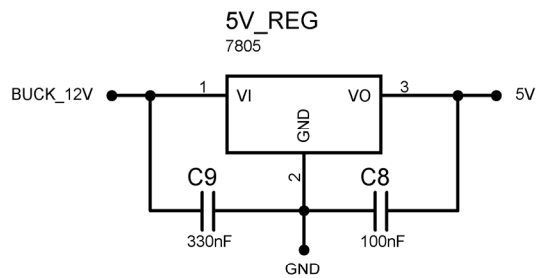
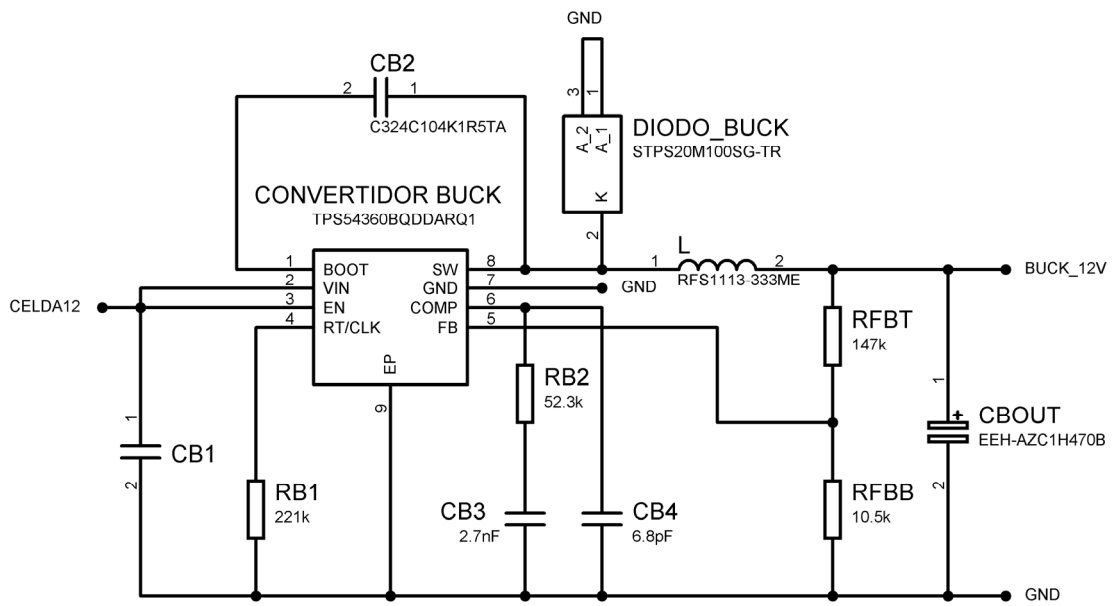
	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial
Dibujado	01/07/2024	Luca Cobelas		Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
				Nombre plano: Etapas de potencia
Escala:	Nombre del proyecto: Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería			
<b>1:1</b>	Descripción: Ventilador, válvula principal y válvula de purgado. Cada etapa de potencia está formada por el driver del transistor, el transistor MOSFET, un diodo de protección y un condensador electrolítico.			Nº de plano: <b>1</b>



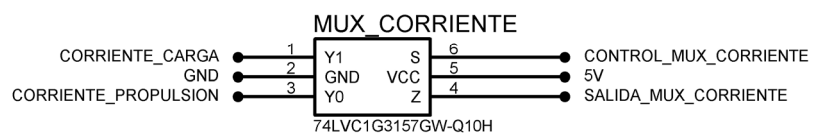
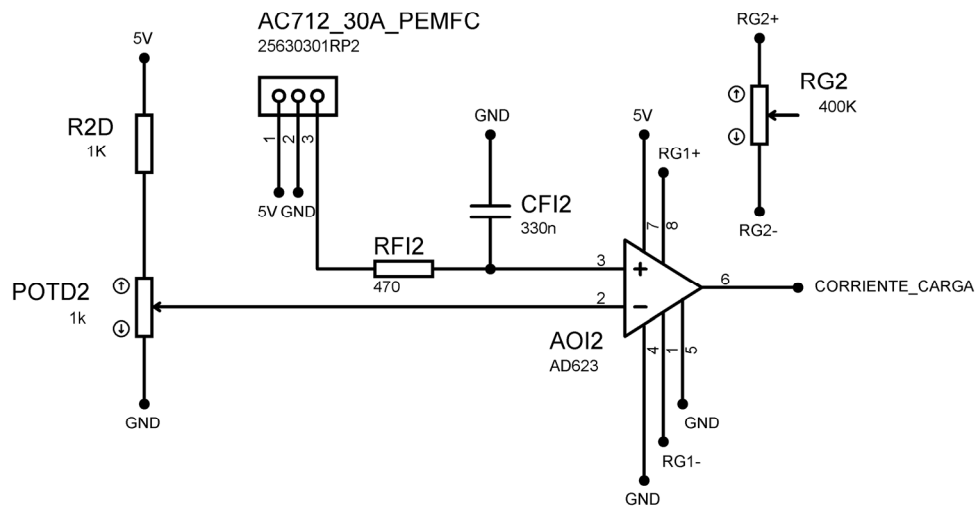
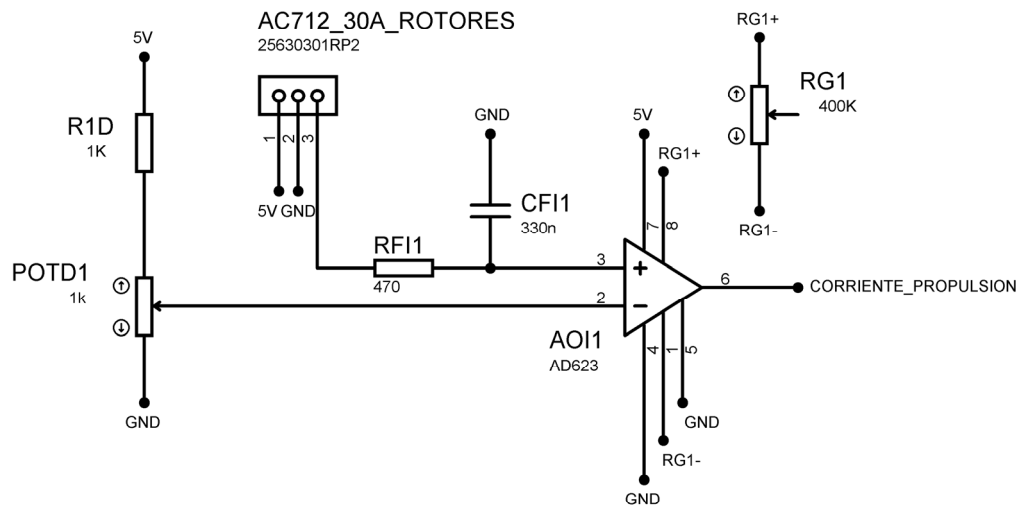
	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial
Dibujado	01/07/2024	Luca Cobelas		Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
				Nombre plano: Acondicionamiento voltajes PEMFC y DAC
Escala:	Nombre del proyecto: Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería			
<b>1:1</b>	Descripción: Salidas de voltaje de la PEMFC H100 de Horizon Technologies a un filtro paso bajo pasivo y un buffer con amplificador operacional. Conexiones para manejar DAC			Nº de plano: <b>2</b>



	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial
Dibujado	01/07/2024	Luca Cobelas		Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
				Nombre plano: Acondicionamiento voltajes batería LiPo
Escala:	Nombre del proyecto: Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería			
1:1	Descripción: Salidas de voltaje de las 12 celdas de la batería G-Tech 12S1P 44.4 V. Filtradas y acondicionadas.			Nº de plano: 3

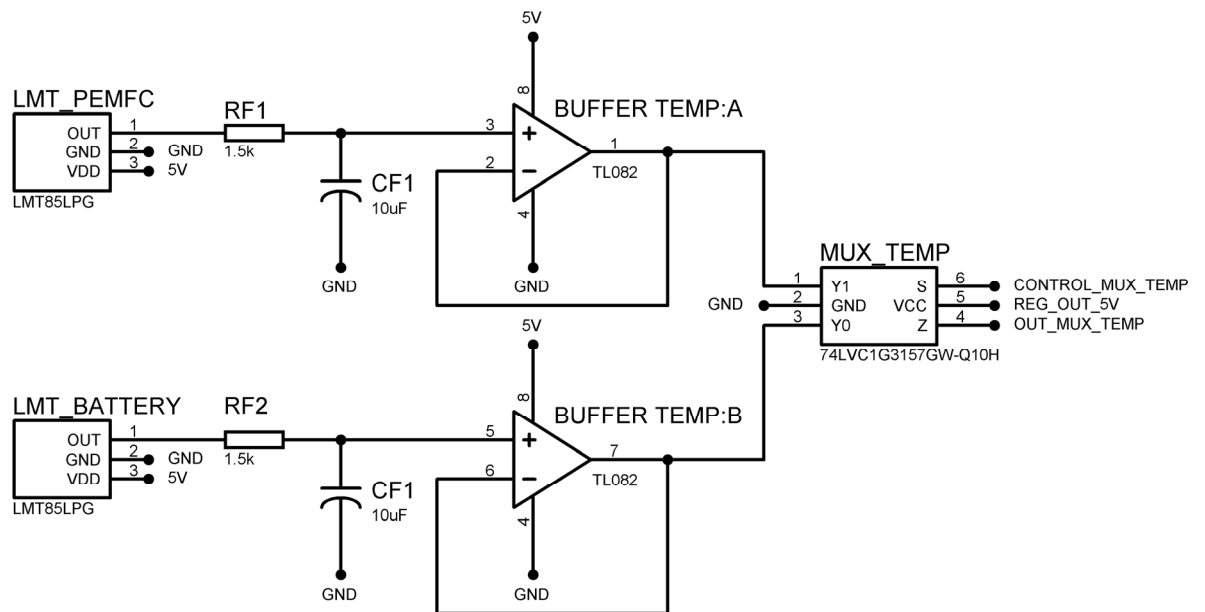


	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial
Dibujado	01/07/2024	Luca Cobelas		Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
				Nombre plano: Convertidor buck y reguladores de tensión lineales
Escala:	Nombre del proyecto: Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería			
1:1	Descripción: Convertidor conmutado buck para la alimentación de todo el sistema de control digital, dos reguladores de tensión para el microcontrolador y los AO del circuito			Nº de plano: 4

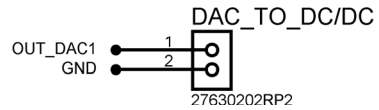
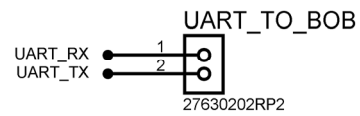
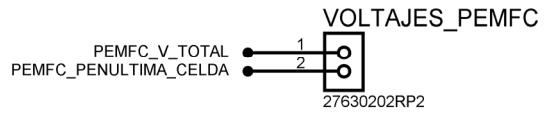
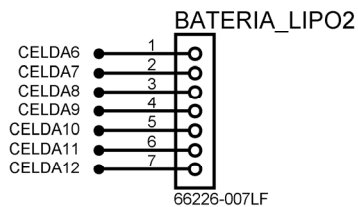
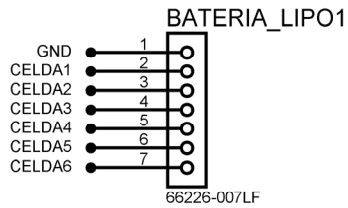
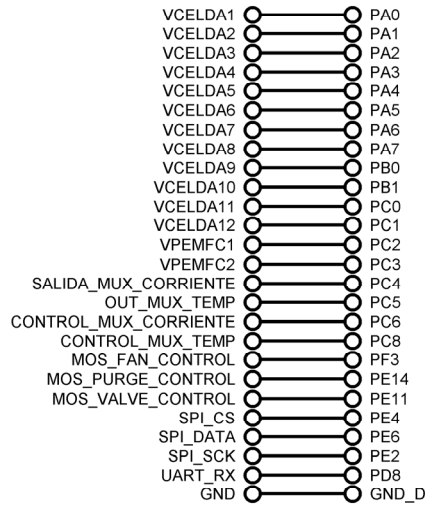


	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial
Dibujado	01/07/2024	Luca Cobelas		Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
				Nombre plano: Sensores de corriente y multiplexado
Escala:	Nombre del proyecto: Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería			
1:1	Descripción: Filtrado y acondicionamiento de las dos señales de corriente. Multiplexadas 2:1.			Nº de plano: 5





	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial
Dibujado	01/07/2024	Luca Cobelas		Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
				Nombre plano: Sensores de temperatura y multiplexado
Escala:	Nombre del proyecto: Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería			
1:1	Descripción: Salida de los sensores LMT85 del sistema, filtradas y multiplexadas.			Nº de plano: 6



	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial
Dibujado	01/07/2024	Luca Cobelas		Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
				Nombre plano: Conectores y conexiones al microcontrolador
Escala:	Nombre del proyecto: Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería			
1:1	Descripción: Conectores de entradas y salidas al sistema híbrido. Esquema conexiones componentes al microcontrolador STM32F412ZG			Nº de plano: 7



# Control digital de la gestión de energía de un sistema hibrido pila de combustible-batería

Trabajo Fin de Grado

## **PRESUPUESTO**

AUTOR/A: Cobelas Engel, Camilo Luca



## ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

<b>CAPÍTULO 1. OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2. COSTES MATERIALES .....</b>	<b>3</b>
2.1 PRESUPUESTO PARCIAL Nº1: MATERIAL PARA EL CONTROL DIGITAL Y ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DEL SISTEMA.....	3
2.2 PRESUPUESTO PARCIAL Nº2: MATERIAL BATERÍA DE LITIO POLÍMERO .....	3
2.3 PRESUPUESTO PARCIAL Nº3: MATERIAL CONVERTIDOR CONMUTADO Y REGULADORES. ....	4
2.4 PRESUPUESTO PARCIAL Nº4: MATERIAL SENSORES DEL SISTEMA HÍBRIDO.....	4
2.5 PRESUPUESTO PARCIAL Nº5: SUMA DE LOS COSTES MATERIALES. ....	5
<b>CAPÍTULO 3. AMORTIZACIÓN DEL EQUIPO INFORMÁTICO .....</b>	<b>5</b>
3.1 PRESUPUESTO PARCIAL Nº6: AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS INFORMÁTICOS.....	5
<b>CAPÍTULO 4. MANO DE OBRA .....</b>	<b>5</b>
4.1 PRESUPUESTO PARCIAL Nº7: ELECCIÓN DE COMPONENTES, MONTAJE Y VALIDACIÓN .....	6
4.2 PRESUPUESTO PARCIAL Nº8: PROGRAMACIÓN SOFTWARE. ....	6
4.3 PRESUPUESTO PARCIAL Nº9: REUNIONES DE SEGUIMIENTO.....	6
4.4 PRESUPUESTO PARCIAL Nº10: COSTE TOTAL MANO DE OBRA DIRECTA E INDIRECTA.....	6
<b>CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL .....</b>	<b>7</b>
5.1 PRESUPUESTO Nº1: COSTE DE LA EJECUCIÓN MATERIAL .....	7
<b>CAPÍTULO 6. EJECUCIÓN POR CONTRATA .....</b>	<b>7</b>
6.1 PRESUPUESTO Nº2: COSTE DE LA EJECUCIÓN POR CONTRATA. ....	7
<b>CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIONES .....</b>	<b>8</b>
7.1 PRESUPUESTO Nº3: COSTE BASE DE LICITACIONES.....	8

## CAPÍTULO 1. OBJETIVO

El presupuesto que se desglosa a continuación pretende estimar los costes económicos de la elección de los componentes, diseño del hardware y software para el control digital y posterior testeo de este. En primer lugar, se desglosan los costes materiales, relacionados con los componentes electrónicos para el montaje. En segundo lugar, se incluye la amortización de los equipos informáticos del alumno. Posteriormente, se incluye la mano de obra.

## CAPÍTULO 2. COSTES MATERIALES

Los costes materiales engloban el material necesario para el montaje de los circuitos del sistema de control. Se desglosan en:

### 2.1 PRESUPUESTO PARCIAL N°1: Material para el control digital y acondicionamiento de las señales del sistema.

N°	Uds.	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
C1	1.00	Tarjeta de desarrollo NUCLEO 144	17.26	17.26
C2	1.00	Placa BOB-17312	14.23	14.23
C3	4.00	Quad OP amp TL974 IN	3.76	15.04
C4	1.00	DAC MCP4921	2.23	2.23
C5	2.00	AOI AD623	4.32	8.64
C6	16.00	Condensador cerámico 330 nF	0.17	2.72
C7	20.00	Potenciómetro 1 kOhm	0.09	1.80
C8	100.00	Cables macho-macho	0.01	1.00
C9	100.00	Cables macho-hembra	0.01	1.00
C10	2.00	Multiplexor sn74lvc1g66	1.98	3.96
			<b>TOTAL</b>	<b>67.88</b>

### 2.2 PRESUPUESTO PARCIAL N°2: Material batería de Litio Polímero

N°	Uds.	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
A1	1.00	Batería G-Tech 5500 mAh 44.4V 12S	205.96	205.96
A2	5.00	Cable 10 AWG Negro (1 m)	2.00	10.00
A3	5.00	Cable 10 AWG Rojo (1 m)	2.00	10.00
A4	5.00	Conector EC5 Macho	0.25	1.25
A5	5.00	Conector EC5 Hembra	0.25	1.25
			<b>TOTAL</b>	<b>228.46</b>

### 2.3 PRESUPUESTO PARCIAL N°3: Material convertidor conmutado y reguladores.

Nº	Uds.	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
P1	1.00	Convertidor Buck tps 54360b-q1	5.26	5.26
P2	1.00	Diodo STPS20M100SG-TR	0.86	0.86
P3	1.00	Bobina RFS1113-333ME	0.87	0.87
P4	1.00	Condensador EEH-AZC1H470B	0.19	0.19
P5	1.00	Condensador C324C104K1R5TA	0.23	0.23
P6	3.00	Condensador 30 nF	0.10	0.30
P7	1.00	Condensador 2.7 nF	0.10	0.10
P8	1.00	Condensador 6.8 pF nF	0.10	0.10
P9	2.00	Condensador 330 nF	0.10	0.20
P10	2.00	Condensador 100 nF	0.10	0.20
P11	1.00	Resistencia 52.3k	0.08	0.08
P12	1.00	Resistencia 10.5k	0.08	0.08
P13	1.00	Resistencia 147k	0.08	0.08
P14	1.00	Regulador de tensión lineal 7812	4.43	4.43
P15	1.00	Regulador de tensión lineal 7805	3.23	3.23
P16	3.00	Mosfet IRF830AS	1.55	4.65
P17	3.00	Diodo BY229	1.23	3.69
P18	3.00	Itty bitty driver MIC4416YM4-TR	2.78	8.34
P19	3.00	Condensador 470 uF	1.29	3.87
TOTAL				36.76

### 2.4 PRESUPUESTO PARCIAL N°4: Material sensores del sistema híbrido.

Nº	Uds.	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
S1	2.00	Sensor de corriente ACS712 - 30A	4.29	8.58
S2	2.00	PCB 25x25 mm	2.00	4.00
S3	2.00	Cable silicona 18 AWG de 100mm	2.50	5.00
S4	6.00	Pin macho regleta 2.54mm	0.01	0.06
S5	2.00	Condensador C1 SMD0805 0.1 µF	0.05	0.10
S6	2.00	Condensador C3 SMD0805 1 nF	0.05	0.10
S7	2.00	Diodo LED D1 SMD0805	0.20	0.40
S8	2.00	Resistencia R1 SMD0603 330 Ω	0.10	0.20
S9	2.00	Resistencia fija 470 Ω	0.10	0.20
S10	2.00	Sensor temperatura LMI85LPG	2.23	4.46
TOTAL				23.10



## 2.5 PRESUPUESTO PARCIAL N°5: Suma de los costes materiales.

El presupuesto parcial N°5 referente a los costes materiales es:

Nº	Uds.	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
2.1	1	Control digital y acondicionamiento	67.88	67.88
2.2	1	Batería LiPo	228.46	228.46
2.3	1	Etapas de potencia	36.76	36.76
2.4	1	Sensores	23.1	23.1
TOTAL				356.2

## CAPÍTULO 3. AMORTIZACIÓN DEL EQUIPO INFORMÁTICO

En la realización del presente proyecto se ha empleado un portátil marca MSI modelo Creator 15M. Este portátil tiene un precio de compra nuevo de 1517.53 €. Aplicando la fórmula de amortización para equipos informáticos:

$$AMORT = \frac{USO(AÑOS)}{PERIODO(AÑOS)} * PRECIO(€)$$

Teniendo en cuenta un periodo de amortización de 6 años para el equipo informático y teniendo en cuenta el periodo de búsqueda de componentes, diseño, programación y redacción de la memoria. Se establece la duración en 6 meses. Originando el siguiente presupuesto parcial:

### 3.1 PRESUPUESTO PARCIAL N°6: Amortización de los equipos informáticos.

Nº	USO(años)	Descripción	Precio Unit. (€)	Total amortización(€)
P	0.50	Portátil MSI CREATOR 15M	1517.53	126.46
COSTE TOTAL				126.46

## CAPÍTULO 4. MANO DE OBRA

En el presente capítulo, se contemplan los costes relacionados con el gasto del personal que realizó el proyecto según la dedicación en horas empleada en:

- Selección de componentes, montaje y validación.
- Programación de software.
- Reuniones de seguimiento.

Para establecer el coste directo por hora del personal investigador según los convenios del SGI-UPV (Servicio de Gestión de la I+D+i de la Universidad Politécnica de Valencia), se considera a Camilo Luca Cobelas Engel como ingeniero Electrónico Industrial y Automático recién titulado, además de la imputación de Carlos Sánchez y María Isabel Rocha como Personal Docente Investigador (PDI).

Siguiendo las recomendaciones de la SGI-UPV, la retribución salarial del PDI se establece en 38 €/h. El coste promedio de un recién titulado superior es de 20 €/h.

**4.1 PRESUPUESTO PARCIAL N°7: Elección de componentes, montaje y validación**

N°	HORAS	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
TS	160	TITULADO SUPERIOR	20	3200
PDI1	30	PDI 1	38	1140
PDI2	10	PDI 2	38	380
TOTAL				4720

**4.2 PRESUPUESTO PARCIAL N°8: Programación Software.**

N°	HORAS	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
TS	150	TITULADO SUPERIOR	20	3000
PDI1	10	PDI 1	38	380
PDI2	30	PDI 2	38	1140
TOTAL				4520

**4.3 PRESUPUESTO PARCIAL N°9: Reuniones de seguimiento.**

N°	HORAS	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
TS	20	TITULADO SUPERIOR	20	400
PDI1	20	PDI 1	38	760
PDI2	20	PDI 2	38	760
TOTAL				1920

**4.4 PRESUPUESTO PARCIAL N°10: Coste total mano de obra directa e indirecta.**

Sumando el total de horas por persona se obtiene el siguiente cuadro de precios para la mano de obra empleada. Además, se incluye un porcentaje de mano de obra indirecta, se fija en un 6%.

Nº	HORAS	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
TS	330.00	TITULADO SUPERIOR	20.00	6600.00
PDI1	60.00	PDI 1	38.00	2280.00
PDI2	60.00	PDI 2	38.00	2280.00
TOTAL				11160.00
MANO DE OBRA INDIRECTA				669.60
COSTE TOTAL				11829.60

## CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL

El coste neto de ejecutar el proyecto se obtiene sumando los costes de los presupuestos para la mano de obra, el coste material y la amortización. De esta manera:

### 5.1 PRESUPUESTO N°1: Coste de la ejecución material

Nº	Ud	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
1	1.00	COSTE MATERIAL	356.20	356.20
2	1.00	COSTE AMORTIZACIÓN	126.46	126.46
3	1.00	COSTE MANO DE OBRA	11829.60	11829.60
TOTAL				12312.26

El presupuesto de ejecución material asciende a DOCE MIL TRESCIENTOS DOCE EUROS CON 26 CÉNTIMOS.

## CAPÍTULO 6. EJECUCIÓN POR CONTRATA

A continuación, se contabiliza el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). Este incluye los costes derivados de la ejecución del proyecto como material del laboratorio, recursos básicos como agua y luz. Se fijan los gastos generales en un 10 %. Al precio final se suma un porcentaje de beneficio industrial del 5 %.

### 6.1 PRESUPUESTO N°2: Coste de la ejecución por contrata.

Nº	Ud	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
1	1.00	EJECUCIÓN MATERIAL	12312.26	12312.26
2	1.00	GASTOS GENERALES	1231.23	1231.23
3	1.00	BENEFICIO INDUSTRIAL	615.61	615.61
TOTAL				14159.10

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a CATORCE MIL CIENTO CINCUENTA Y NUEVE EUROS CON 10 CÉNTIMOS.

## CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIONES

En el Presupuesto Base de Licitaciones (PBL) se incluye el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) del 21% al Presupuesto de Ejecución por Contrata.

### 7.1 PRESUPUESTO N°3: Coste Base de Licitaciones.

Nº	Ud	Descripción	Precio Unit. (€)	Total(€)
1	1.00	PRESUPUESTO EJECUCION CONTRATA	14159.10	14159.10
2	1.00	IVA(21%)	2973.41	2973.41
TOTAL				17132.51

El presupuesto de base de licitaciones asciende a DIECISIETE MIL CIENTO TREINTA Y DOS EUROS CON CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS.



Control digital de la gestión de energía de un sistema  
hibrido pila de combustible-batería

Trabajo Fin de Grado

# **PLIEGO DE CONDICIONES**

AUTOR/A: Cobelas Engel, Camilo Luca



## ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

<b>CAPÍTULO 1.</b>	<b>DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PLIEGO .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2.</b>	<b>NORMATIVA GENERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 3.</b>	<b>CONDICIONES GENERALES .....</b>	<b>3</b>
3.1	CONDICIONES FACULTATIVAS.....	3
3.2	CONDICIONES ECONÓMICAS.....	4
3.3	CONDICIONES LEGALES.....	6
<b>CAPÍTULO 4.</b>	<b>CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES .....</b>	<b>7</b>
4.1	DISEÑO Y ESPECIFICACIONES.....	7
4.2	REQUISITOS DEL ORDENADOR .....	7
4.3	COMPONENTES .....	7
4.4	COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS .....	7
4.5	SOFTWARE .....	7
4.6	IMPLEMENTACIÓN GRAFICADO EN TIEMPO REAL.....	8



## **CAPÍTULO 1. Definición y alcance del pliego**

## **CAPÍTULO 2. Normativa general**

Para realizar el pliego de condiciones se debe tener en cuenta las normativas de seguridad eléctrica, como la norma IEC 60950 o la norma IEC 62368, que establecen requisitos para la seguridad de equipos eléctricos y electrónicos de uso general. Se deben tener en cuenta las normativas de compatibilidad electromagnética (EMC): Las normativas de EMC aseguran que los dispositivos electrónicos no interfieran entre sí y cumplan con los límites de emisiones electromagnéticas establecidos.

## **CAPÍTULO 3. Condiciones generales**

### **3.1 Condiciones facultativas**

#### **Promotor del proyecto:**

El promotor del proyecto es el tutor del Trabajo Final de Grado (TFG) perteneciente al Departamento de Ingeniería Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño (ETSID) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). La evaluación final del TFG se realizará por el director del proyecto y el tribunal de Evaluación de Trabajos Finales de Grado de la ETSID.

#### **Controles de calidad y ensayos:**

El promotor debe proporcionar pruebas reales que demuestren el correcto funcionamiento del sistema. Estas pruebas, acompañadas de los datos obtenidos, servirán como evidencia de que el sistema cumple con los objetivos.

#### **Recepción provisional del programa:**

El promotor recibirá una copia del programa antes de la presentación del proyecto en la ETSID.

#### **Plazo de entrega:**

El plazo de entrega es el período de dos cursos académicos otorgados para completar el TFG.

#### **Obligaciones y derechos del contratista:**

#### **Corresponde al contratista:**

- Confirmar por escrito que la documentación proporcionada es suficiente para comprender el funcionamiento del dron.
- Dirigir la ejecución material de acuerdo con el proyecto, las normas técnicas y las reglas de construcción adecuadas.
- Elaborar el Plan de Seguridad y Salud de la instalación y tomar medidas preventivas para garantizar la seguridad del personal.

- Asegurar la calidad de los materiales utilizados.
- Proporcionar al Ingeniero Técnico la lista de materiales necesarios.
- Poseer por escrito las especificaciones y documentos relevantes del proyecto.
- Acordar con el Promotor las actas de recepción provisional y definitiva.
- Conocer y cumplir las leyes relacionadas con su actividad profesional.
- Contratar seguros de accidentes de trabajo y daños a terceros durante la instalación.
- Designar un representante en la instalación con facultades para tomar decisiones.
- Acordar con el Ingeniero Técnico el acta de replanteo de la obra.
- No se aceptarán reclamaciones por falta de concordancia entre la Memoria del Proyecto y los demás documentos del proyecto.
- El sistema de monitorización debe cumplir los requisitos mencionados en la memoria.
- Verificar el buen funcionamiento del equipo antes de la entrega definitiva.

#### **Obligaciones y derechos del proyectista y director de obra:**

- Realizar el proyecto según las condiciones del contratista.
- Realizar modificaciones, adiciones o rectificaciones del proyecto según sea necesario.
- Respetar los derechos de autor.
- Consultar con el contratista cualquier modificación o solución alternativa.
- Informar periódicamente al promotor sobre el estado del proyecto.
- Cumplir con la legislación vigente.
- Cumplir con las normativas generales y específicas que afecten al proyecto.
- Disponer del material necesario para el proyecto.
- Resolver problemas técnicos imprevistos durante la ejecución del proyecto.
- Proporcionar especificaciones del programa con anticipación.
- Dirigir la obra y coordinarla con el proyecto de ejecución material.
- Asistir a las instalaciones según sea necesario.

### **3.2 Condiciones económicas**

#### **Facultades del promotor del proyecto:**

Dado que se trata de un Trabajo Final de Grado (TFG) destinado a un proyecto de investigación, no se prevé el pago de honorarios. Sin embargo, todos los gastos se tendrán en cuenta al elaborar el presupuesto.

#### **Seguros:**

El contratista deberá contar con los seguros necesarios para cubrir posibles daños en los equipos durante la ejecución del proyecto, así como un seguro de responsabilidad civil. Además, el contratista estará obligado a asegurar la obra durante todo el período de ejecución, con una cuantía proporcional al valor de los objetos asegurados. En caso de incidentes, cualquier pago realizado por la compañía aseguradora se realizará a nombre del propietario. Los riesgos asegurados y las condiciones de la póliza se comunicarán al propietario para obtener su conformidad.

#### **Precios:**

##### **Composición de precios unitarios:**

El cálculo de los precios de las diferentes unidades se obtiene sumando los costes directos, indirectos, los gastos generales y el beneficio industrial.

##### **Se considerarán costes directos:**

- Mano de obra directamente involucrada en la ejecución de la unidad de obra.
- Materiales integrados en cada unidad o necesarios para su construcción, a precios de mercado.
- Equipos y sistemas técnicos de seguridad e higiene para la prevención y protección de accidentes y enfermedades profesionales.
- Gastos de personal, combustible, energía, etc., utilizados en el funcionamiento de los aparatos e instalaciones empleados en la ejecución de la unidad de obra.
- Gastos de amortización y conservación de instalaciones, sistemas y equipos mencionados anteriormente.

##### **Se considerarán costes indirectos:**

- Gastos de instalación de oficinas en el lugar de trabajo, comunicaciones, construcción de almacenes, talleres, laboratorios, seguros, etc.
- Personal técnico y administrativo que participa de forma indirecta en el proyecto.

##### **Beneficio industrial:**

El beneficio industrial del contratista se establece en un 6% sobre la suma total de los puntos anteriores.

##### **Precio de ejecución material:**

El precio de ejecución material es la suma de los puntos anteriores, excepto el beneficio industrial.

##### **Precio final:**

El precio final es la suma de los costes directos, indirectos, gastos generales y beneficio industrial. A esta suma se le aplicará un IVA del 21%, que no está incluido en el precio.

### 3.3 Condiciones legales

Este capítulo aborda las disposiciones legales generales del proyecto, las responsabilidades y derechos del Contratista, el Contrato y los Impuestos.

#### **Contratista:**

El Contratista debe tener la capacidad de llevar a cabo el proyecto de manera adecuada y siguiendo las indicaciones establecidas en los pliegos de condiciones, con el fin de lograr el resultado final requerido según lo especificado en la memoria.

Una vez finalizado el proyecto, el Contratista debe proporcionar un técnico capacitado para enseñar al personal de la empresa promotora cómo utilizar y controlar la maquinaria.

Todas las subcontratas deben cumplir los mismos criterios establecidos para el contrato principal.

#### **Contrato:**

El contrato debe incluir el presupuesto total para la realización del proyecto. Además, el contrato siempre debe formalizarse por escrito y cumplir con todos los requisitos legales aplicables.

#### **Responsabilidades del contratista:**

En esta sección se especifican las responsabilidades que el Contratista debe asumir durante la vigencia del contrato, incluyendo:

- Solvencia económica para pagar los materiales, la mano de obra y otros gastos.
- Garantizar una buena calidad de ejecución.
- Cumplir con las obligaciones legales y laborales relacionadas con el personal.

#### **Impuestos:**

Se exigirá que el Contratista posea las licencias y certificados necesarios para llevar a cabo el proyecto.

Asimismo, deberá estar al día en el pago de impuestos, tasas y contribuciones necesarias para el desarrollo regular de las actividades de la empresa.

Todo el personal contratado debe estar legalmente registrado y dado de alta en la Seguridad Social.

El precio del producto estará sujeto al impuesto sobre el valor añadido (IVA) del 21%.

#### **Causas de rescisión del proyecto:**

El promotor del proyecto puede rescindir el contrato con el proyectista en los siguientes casos:

- Retraso excesivo en la ejecución del proyecto.

- Abandono del proyecto sin causa justificada.
- Fallecimiento del proyectista.
- Causas administrativas.

Acuerdo mutuo entre las partes, siempre y cuando ninguna de ellas se considere gravemente perjudicada.

#### **Condiciones legales respecto a la UPV:**

El autor declara ser el titular de los derechos de propiedad intelectual relacionados con el trabajo objeto de este acuerdo. Antes de cualquier publicación o divulgación de los documentos, se debe consultar siempre al autor.

Ambas partes se comprometen a informar a la otra parte, tan pronto como tengan conocimiento, sobre cualquier reclamación de terceros relacionada con el trabajo.

#### **CAPÍTULO 4. Condiciones técnicas particulares**

Este Pliego de Condiciones Técnicas Particulares comprende el conjunto de características que deberán cumplir los equipos empleados.

##### **4.1 Diseño y especificaciones**

La placa de desarrollo utilizada debe ser la NUCLEO-144 STM32F412ZG, de la empresa STMicroelectronics, por lo que la placa de interfaz debe disponer de 2 conectores GPIO de 72 pines en paralelo para su conexión.

##### **4.2 Requisitos del Ordenador**

El ordenador tiene que poseer al menos 8 gb de ram, una pantalla de 15 pulgadas y conexión a internet.

##### **4.3 Componentes**

Los componentes adquiridos para el montaje de los circuitos de test han de ser de fabricantes conocidos como puede ser Analog Devices, Texas Instruments, entre otros. Han de seguir la normativa del marco europeo.

##### **4.4 Compatibilidad electromagnética de los componentes electrónicos**

Los componentes electrónicos del sistema deberán estar regulados por el Real Decreto Ley 1580/2006 del 22 de diciembre. Esta ley regula la compatibilidad electromagnética de los equipos electrónicos que puedan crear perturbaciones electromagnéticas, o en caso contrario, que su funcionamiento pueda verse perjudicado por dichas perturbaciones.

Así, el sistema debe cumplir con un nivel legal de compatibilidad electromagnética con el fin de garantizar la no intromisión en el resto de espacio electromagnético.

##### **4.5 Software**



El usuario deberá tener conocimientos de Windows y Linux. El usuario deberá tener conocimientos de programación en C++ y Python.

#### **4.6 Implementación graficado en tiempo real**

El diseño de un programa en un portátil para el graficado de las señales de entrada es imprescindible. Es necesario aportar el código de la implementación.





# Control digital de la gestión de energía de un sistema hibrido pila de combustible-batería

Trabajo Fin de Grado

## **ANEXO I: CÁLCULOS TEÓRICOS**

AUTOR/A: Cobelas Engel, Camilo Luca

Cálculos teóricos para el TFG titulado 'Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería' realizado por Camilo Luca Cobelas Engel.

Cálculos en Mathcad 15.

## **FILTRO PASO BAJO 1er ORDEN RC** frecuencia de corte = 1 kHz

$$R_f := 470\Omega \quad f_c := 1\text{kHz}$$

Se elige arbitrariamente la resistencia para calcular Cf

$$C_f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot f_c} = 338.628\text{nF}$$

## **FILTRO PASO BAJO 1er ORDEN RC** frecuencia de corte = 10 Hz

$$R_f := 1.5\text{k}\Omega \quad f_c := 10\text{Hz}$$

Se elige arbitrariamente la resistencia para calcular Cf

$$C_f := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot f_c} = 10.61\mu\text{F}$$

$$V_{\text{out}} := 2V \quad R_2 := 0.8k\Omega \quad \text{factor} := 1.121212$$

## VOLTAJE TOTAL PEMFC

$$V_{\text{pemfc}_{\text{nom}}} := 14V$$

$$V_{\text{pemfc}_{\text{max}}} := 20V$$

$$V_{\text{pemfc}_{\text{min}}} := 0V$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{pemfc}_{\text{nom}}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 4.8 \cdot k\Omega$$

$$V_{\text{out}_{\text{min}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{pemfc}_{\text{min}}} = 0$$

$$V_{\text{out}_{\text{max}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{pemfc}_{\text{max}}} = 2.857 V$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out}_{\text{max}}} - V_{\text{out}_{\text{min}}} = 2.857 V$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{pemfc}_{\text{max}}}}{R_1 + R_2} = 3.571 \cdot \text{mA}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{pemfc}_{\text{nom}}}} = 0.143$$

$$P_{\text{disipada}_{\text{max}}} := V_{\text{pemfc}_{\text{max}}} \cdot i_{\text{max}} = 71.429 \cdot \text{mW}$$

## VOLTAJE CELDA 11 PEMFC

$$V_{\text{pemfc}_{\text{nom}}} := 13V$$

$$V_{\text{pemfc}_{\text{max}}} := 20V$$

$$V_{\text{pemfc}_{\text{min}}} := 0V$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{pemfc}_{\text{nom}}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 4.4 \cdot k\Omega$$

$$V_{\text{out}_{\text{min}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{pemfc}_{\text{min}}} = 0$$

$$V_{\text{out}_{\text{max}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{pemfc}_{\text{max}}} = 3.077 V$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out}_{\text{max}}} - V_{\text{out}_{\text{min}}} = 3.077 V$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{pemfc}_{\text{max}}}}{R_1 + R_2} = 3.846 \cdot \text{mA}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{pemfc}_{\text{nom}}}} = 0.154$$

$$P_{\text{disipada}_{\text{max}}} := V_{\text{pemfc}_{\text{max}}} \cdot i_{\text{max}} = 76.923 \cdot \text{mW}$$

## VOLTAJE TOTAL BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 44.4 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 49.782 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 39.6 \text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 16.96 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784 \text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242 \text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459 \text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 139.54 \cdot \text{mW}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.045$$

## VOLTAJE CELDA 11 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 40.7 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 45.633 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 36.3 \text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 15.48 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784 \text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242 \text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459 \text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 127.912 \cdot \text{mW}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.049$$

# VOLTAJE CELDA 10 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 37\text{V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 41.485\text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 33\text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 14 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784\text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242\text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459\text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 116.283 \cdot \text{mW}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.054$$

# VOLTAJE CELDA 9 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 33.3\text{V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 37.336\text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 29.7\text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 12.52 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784\text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242\text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459\text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 104.655 \cdot \text{mW}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.06$$

## VOLTAJE CELDA 8 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 29.6 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 33.188 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 26.4 \text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 11.04 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784 \text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242 \text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459 \text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.068$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 93.027 \cdot \text{mW}$$

## VOLTAJE CELDA 7 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 25.9 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 29.039 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 23.1 \text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 9.56 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784 \text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242 \text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459 \text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 81.398 \cdot \text{mW}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.077$$

## VOLTAJE CELDA 6 BATERÍA

$$V_{\text{celda}_{\text{nom}}} := 22.2\text{V}$$

$$V_{\text{celda}_{\text{max}}} := V_{\text{celda}_{\text{nom}}} \cdot \text{factor} = 24.891\text{V}$$

$$V_{\text{celda}_{\text{min}}} := \frac{V_{\text{celda}_{\text{nom}}}}{\text{factor}} = 19.8\text{V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda}_{\text{nom}}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 8.08 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out}_{\text{min}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda}_{\text{min}}} = 1.784\text{V}$$

$$V_{\text{out}_{\text{max}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda}_{\text{max}}} = 2.242\text{V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out}_{\text{max}}} - V_{\text{out}_{\text{min}}} = 0.459\text{V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda}_{\text{max}}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$P_{\text{disipada}_{\text{max}}} := V_{\text{celda}_{\text{max}}} \cdot i_{\text{max}} = 69.77 \cdot \text{mW}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda}_{\text{nom}}}} = 0.09$$

## VOLTAJE CELDA 5 BATERÍA

$$V_{\text{celda}_{\text{nom}}} := 18.5\text{V}$$

$$V_{\text{celda}_{\text{max}}} := V_{\text{celda}_{\text{nom}}} \cdot \text{factor} = 20.742\text{V}$$

$$V_{\text{celda}_{\text{min}}} := \frac{V_{\text{celda}_{\text{nom}}}}{\text{factor}} = 16.5\text{V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda}_{\text{nom}}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 6.6 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out}_{\text{min}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda}_{\text{min}}} = 1.784\text{V}$$

$$V_{\text{out}_{\text{max}}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda}_{\text{max}}} = 2.242\text{V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out}_{\text{max}}} - V_{\text{out}_{\text{min}}} = 0.459\text{V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda}_{\text{max}}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$P_{\text{disipada}_{\text{max}}} := V_{\text{celda}_{\text{max}}} \cdot i_{\text{max}} = 58.142 \cdot \text{mW}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda}_{\text{nom}}}} = 0.108$$



## VOLTAJE CELDA 4 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 14.8 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 16.594 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 13.2 \text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 5.12 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784 \text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242 \text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459 \text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.135$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 46.513 \cdot \text{mW}$$

## VOLTAJE CELDA 3 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 11.1 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 12.445 \text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 9.9 \text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 3.64 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784 \text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242 \text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459 \text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.18$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 34.885 \cdot \text{mW}$$

## VOLTAJE CELDA 2 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 7.4\text{V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 8.297\text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 6.6\text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 2.16 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784\text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242\text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459\text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.27$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 23.257 \cdot \text{mW}$$

## VOLTAJE CELDA 1 BATERÍA

$$V_{\text{celda\_nom}} := 3.7\text{V}$$

$$V_{\text{celda\_max}} := V_{\text{celda\_nom}} \cdot \text{factor} = 4.148\text{ V}$$

$$V_{\text{celda\_min}} := \frac{V_{\text{celda\_nom}}}{\text{factor}} = 3.3\text{ V}$$

$$R_1 := \frac{R_2 \cdot (V_{\text{celda\_nom}} - V_{\text{out}})}{V_{\text{out}}} = 0.68 \cdot \text{k}\Omega$$

$$V_{\text{out\_min}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_min}} = 1.784\text{ V}$$

$$V_{\text{out\_max}} := \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{celda\_max}} = 2.242\text{ V}$$

$$\text{Rango} := V_{\text{out\_max}} - V_{\text{out\_min}} = 0.459\text{ V}$$

$$i_{\text{max}} := \frac{V_{\text{celda\_max}}}{R_1 + R_2} = 2.803 \cdot \text{mA}$$

$$G := \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{celda\_nom}}} = 0.541$$

$$P_{\text{disipada\_max}} := V_{\text{celda\_max}} \cdot i_{\text{max}} = 11.628 \cdot \text{mW}$$



Control digital de la gestión de energía de un sistema  
híbrido pila de combustible-batería

Trabajo Fin de Grado

# **ANEXO II: SOFTWARE STM32CUBEIDE**

AUTOR/A: Cobelas Engel, Camilo Luca



```
/* Includes -----*/
```

```
#include "main.h"
```

```
#include "adc.h"
```

```
#include "dma.h"
```

```
#include "spi.h"
```

```
#include "tim.h"
```

```
#include "usart.h"
```

```
#include "usb_otg.h"
```

```
#include "gpio.h"
```

```
#include "fsm.c"
```

```
#include "fsm.h"
```

```
/* Private includes -----*/
```

```
/* USER CODE BEGIN Includes */
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <string.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
/* USER CODE END Includes */
```

```
/* Private typedef -----*/
```

```
/* USER CODE BEGIN PTD */
```

```
/* USER CODE END PTD */
```

```
/* Private define -----*/
```

```
/* USER CODE BEGIN PD */
```

```
#define VREF 3.317
```

```
/* USER CODE END PD */
```



```
/* Private macro -----*/

/* USER CODE BEGIN PM */

#define ROUND_TO_3_DECIMALS(value) (roundf((value) * 1000) / 1000)

/* USER CODE END PM */

/* Private variables -----*/

/* USER CODE BEGIN PV */

int i, flag=0, flag_t=0;

uint16_t AdcResults[16];

float Voltages[16], temp1, temp2, V_spi, I, V=0;

float time = 0.0;

uint8_t uBuf[30] = "0.432,0.322,0.848,0.392";

uint16_t spiBuf[1];

uint16_t Dn= 0x0000;

/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----*/

void SystemClock_Config(void);

/* USER CODE BEGIN PFP */

float digital_to_voltage(int d);

uint16_t voltage_to_digital(float v);

float lmt_voltage_to_temp(float v);

void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc);

void floatToString(float value1, float value2, float value3, float value4, char *buffer, int
bufferSize);

/* USER CODE END PFP */
```



```
/* Private user code -----*/

/* USER CODE BEGIN 0 */

//DEFINICIÓN MÁQUINAS DE ESTADPS

// ESTADOS

enum state{

    VENTILADOR_OFF,

    VENTILADOR_ON,

    VENTILADOR_ON_ALTA,

    LIPO_OFF,

    LIPO_DESEQUILIBRADA,

    LIPO_ON,

    LIPO_SOBRECALENTADA,

    STACK_OFF,

    STACK_ON,

    STACK_PURGADO,

    STACK_CALIENTE

};

// EVENTOS

static uint8_t stack_on (fsm_t* this);

static uint8_t stack_off (fsm_t* this);

static uint8_t stack_temperatura_alta (fsm_t* this);

static uint8_t stack_temperatura_baja (fsm_t* this);

static uint8_t lipo_descargada (fsm_t* this);

static uint8_t lipo_cargada (fsm_t* this);
```



```
static uint8_t celdas_desequilibradas (fsm_t* this);

static uint8_t celdas_equilibradas (fsm_t* this);

static uint8_t lipo_caliente (fsm_t* this);

static uint8_t lipo_fria (fsm_t* this);

static uint8_t sistema_on (fsm_t* this);

static uint8_t sistema_off (fsm_t* this);

static uint8_t eficiencia_stack_baja (fsm_t* this);

static uint8_t stack_se_calienta (fsm_t* this);

static uint8_t stack_se_enfria (fsm_t* this);

static uint8_t fin_purgado (fsm_t* this);

// ACCIONES

static uint8_t ventilador_on_ecuacion (fsm_t* this);

static uint8_t encender_ventilador (fsm_t* this);

static uint8_t apagar_ventilador (fsm_t* this);

static uint8_t corriente_para_cargar_lipo (fsm_t* this);

static uint8_t corriente_sin_cargar_lipo (fsm_t* this);

static uint8_t encender_stack (fsm_t* this);

static uint8_t apagar_stack (fsm_t* this);

static uint8_t iniciar_purgado (fsm_t* this);

static uint8_t cerrar_valvula_main (fsm_t* this);

static uint8_t cerrar_valvula_purgado (fsm_t* this);

static uint8_t nada (fsm_t* this);
```



//TABLA DE ESTADOS DE CADA MEF

//VENTILADOR

```
static fsm_trans_t tabla_ventilador[] = {  
  
    { VENTILADOR_OFF, stack_on, VENTILADOR_ON, ventilador_on_ecuacion  
},  
  
    { VENTILADOR_ON, stack_off, VENTILADOR_OFF, apagar_ventilador },  
  
    { VENTILADOR_ON, stack_temperatura_alta, VENTILADOR_ALTA,  
encender_ventilador },  
  
    { VENTILADOR_ALTA, stack_off, VENTILADOR_OFF, apagar_ventilador },  
  
    { VENTILADOR_ALTA, stack_temperatura_baja, VENTILADOR_BAJA,  
ventilador_on_ecuacion },  
  
    { -1, NULL, -1, NULL },  
  
};
```

//FSM PARA CONVERTIDOR DC/DC DE LA SALIDA DE LA PILA

```
static fsm_trans_t tabla_batería[] = {  
  
    { LIPO_NO_RECARGA, lipo_descargada, LIPO_RECARGANDO,  
corriente_para_cargar_lipo },  
  
    { LIPO_NO_RECARGA, celdas_desequilibradas, LIPO_DESEQUILIBRADA,  
corriente_sin_cargar_lipo },  
  
    { LIPO_DESEQUILIBRADA, celdas_equilibradas, LIPO_NO_RECARGA,  
nada },  
  
    { LIPO_RECARGANDO, celdas_desequilibradas, LIPO_DESEQUILIBRADA,  
corriente_sin_cargar_lipo },  
  
    { LIPO_RECARGANDO, lipo_cargada, LIPO_NO_RECARGA,  
corriente_sin_cargar_lipo },  
  
    { LIPO_RECARGANDO, lipo_caliente, LIPO_SOBRECALENTADA,  
corriente_sin_cargar_lipo },  
  
    { LIPO_SOBRECALENTADA, lipo_fria, LIPO_DESEQUILIBRADA, nada },  
  
    { -1, NULL, -1, NULL },  
  
};
```

//FSM PARA LA PEMFC

```
static fsm_trans_t tabla_stack[] = {  
  
    { STACK_OFF, sistema_on, STACK_PURGADO, encender_stack },
```



```
{ STACK_ON, eficiencia_stack_baja, STACK_PURGADO, iniciar_purgado},  
{ STACK_ON, sistema_off, STACK_OFF, apagar_stack },  
{ STACK_ON, stack_se_calienta, STACK_OFF, cerrar_valvula_main },  
{ STACK_PURGADO, fin_purgado, STACK_ON, cerrar_valvula_purgado },  
{ STACK_CALIENTE, stack_se_enfria, STACK_PURGADO, encender_stack },  
{ -1, NULL, -1, NULL },  
  
};
```

```
/* USER CODE END 0 */
```

```
/**
```

```
 * @brief The application entry point.
```

```
 * @retval int
```

```
 */
```

```
int main(void)
```

```
{
```

```
/* USER CODE BEGIN 1 */
```

```
/* USER CODE END 1 */
```

```
/* MCU Configuration-----*/
```

```
/* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
```

```
HAL_Init();
```

```
/* USER CODE BEGIN Init */
```

```
/* USER CODE END Init */
```





```
/* USER CODE BEGIN WHILE */
```

```
HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t *) AdcResults, sizeof(AdcResults) /  
sizeof(AdcResults[0]));
```

```
// Config SPI
```

```
//Poner por defecto CS a 1
```

```
// HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_SET);
```

```
//se configura un Voltaje de 0 a 3.3V
```

```
V = 2.0;
```

```
//Se pasa ese voltaje a un numero de 0 a 4095
```

```
Dn = (uint16_t) ( V * 4095.0) / VREF;
```

```
//Se fuerzan los bit 12 y 13 a 0 para una config correcta del DAC
```

```
Dn = Dn | 0x3000;
```

```
//se le pasa el valor de voltaje en la nueva escala al buffer de spi
```

```
spiBuf[0] = Dn;
```

```
while (1)
```

```
{
```

```
/* USER CODE END WHILE */
```

```
/* USER CODE BEGIN 3 */
```

```
floatToString(temp1, temp2, I, Voltages[1], (char *) uBuf, sizeof(uBuf));
```

```
HAL_UART_Transmit(&huart3, uBuf, sizeof(uBuf), 10);
```

```
HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB, GPIO_PIN_7);
```

```
HAL_Delay(500);
```



```
    }  
  
    /* USER CODE END 3 */  
  
    }  
  
    /**  
     * @brief System Clock Configuration  
     * @retval None  
     */  
  
    void SystemClock_Config(void)  
    {  
        RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};  
        RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};  
  
        /** Configure the main internal regulator output voltage  
         */  
        __HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();  
  
        __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE1);  
  
        /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters  
         * in the RCC_OscInitTypeDef structure.  
         */  
        RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;  
        RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_BYPASS;  
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;  
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;  
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 4;  
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 72;
```



```
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV2;

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 3;

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = 2;

if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

/** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
*/

RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
                               |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;

RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;

RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;

RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;

RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

}

/* USER CODE BEGIN 4 */

float digital_to_voltage(int d){
    float v = (VREF * d * 1000)/4095000.0;
    return v;
}
```

```
float lmt_voltage_to_temp(float v){
```

```
    v = v*1000;
```

```
    float t = (75 * v - 117625) / - 620;
```

```
    return t;
```

```
}
```

```
float volts_to_amps(float v){
```

```
    float amps = (v - 1) / 0.1; // Sensibilidad ACS712 = 0.1 V/A
```

```
    return amps;
```

```
}
```

```
uint16_t voltage_to_digital(float v){
```

```
    uint16_t D;
```

```
    //Se pasa ese voltaje a un numero de 0 a 4095
```

```
    D = (uint16_t) ( v * 4095.0) / VREF;
```

```
    //Se fuerzan los bit 12 y 13 a 0 para una config correcta del DAC
```

```
    D = D | 0x3000;
```

```
    return D;
```

```
}
```

```
void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc){
```

```
    for(int i=0; i < 16; i++){
```

```
        Voltages[i] = digital_to_voltage(AdcResults[i]);
```

```
    }
```

```
    I = volts_to_amps(Voltages[14]);
```



```
if (flag == 0) {  
    tmp1 = lmt_voltage_to_temp(Voltages[15]);  
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_RESET);  
    flag = 1;  
}  
  
else if (flag == 1) {  
    temp2 = lmt_voltage_to_temp(Voltages[15]);  
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_SET);  
    flag = 0;  
}  
  
}  
  
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim){  
    if(htim==&htim4){  
        if(i==0){  
            V=1.0;  
            i=1;  
        }  
        else{  
            V=2.0;  
            i=0;  
        }  
  
        //Se pasa ese voltaje a un numero de 0 a 4095  
        Dn = (uint16_t) ( V * 4095.0) / VREF;  
        //Se fuerzan los bit 12 y 13 a 0 para una config correcta del DAC  
        Dn = Dn | 0x3000;  
        //se le pasa el valor de voltaje en la nueva escala al buffer de spi
```



```
spiBuf[0] = Dn;
```

```
        //ponemos a nivel BAJO el CS
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4,
GPIO_PIN_RESET);

        //Transmitir el valor del voltaje por el canal spi
        HAL_SPI_Transmit(&hspi1, (uint8_t *) spiBuf, sizeof(spiBuf),
100);

        //ponemos a nivel ALTO el CS
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4,
GPIO_PIN_SET);

    }

}
```

```
void floatToString(float value1, float value2, float value3, float value4, char *buffer, int
bufferSize) {

    snprintf(buffer, bufferSize, "%.3f,%.3f,%.3f,%.3f\n", value1, value2, value3, value4);

}
```

```
/* USER CODE END 4 */
```

```
/**
```

```
 * @brief This function is executed in case of error occurrence.
```

```
 * @retval None
```

```
 */
```

```
void Error_Handler(void)
```



```
{
/* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */

/* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
__disable_irq();

while (1)
{
}

/* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 *        where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
/* USER CODE BEGIN 6 */

/* User can add his own implementation to report the file name and line number,
ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */

/* USER CODE END 6 */
}

#endif /* USE_FULL_ASSERT */
```



# Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería

Trabajo Fin de Grado

## **ANEXO III: SOFTWARE PYTHON**

AUTOR/A: Cobelas Engel, Camilo Luca



```
import re
import serial
import time
import threading
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.animation as animation

# Configurar el puerto serial
ser = serial.Serial("COM10", 115200)

# Inicializar listas para almacenar los datos de cada sensor y el tiempo
sensor1_data = []
sensor2_data = []
sensor3_data = []
sensor4_data = []
time_data = []

# Configuración de la figura de matplotlib
fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(3, 1, sharex=True)
fig.suptitle('Temperatura sensores')

# Registrar el tiempo de inicio
start_time = time.time()

# Bloqueo para la sincronización del hilo
data_lock = threading.Lock()

def read_serial():
    global sensor1_data, sensor2_data, sensor3_data, sensor4_data, time_data

    while True:
        arduinoData_binary = ser.readline()
        arduinoData_string = arduinoData_binary.decode('ascii').strip()
        arduinoData_string_cleaned = re.sub(r'[^\d.],', '', arduinoData_string)

        try:
            data = [float(value) for value in arduinoData_string_cleaned.split(',')]
            if len(data) == 4:
                with data_lock:
                    sensor1_data.append(data[0])
                    sensor2_data.append(data[1])
                    sensor3_data.append(data[2])
                    sensor4_data.append(data[3])

                current_time = time.time() - start_time
                time_data.append(current_time)

                sensor1_data = sensor1_data[-50:]
                sensor2_data = sensor2_data[-50:]
                sensor3_data = sensor3_data[-50:]
                sensor4_data = sensor4_data[-50:]
                time_data = time_data[-50:]

        except ValueError:
```

```
print('Error: Data received is not valid')
```

```
# Iniciar el hilo de lectura del puerto serial  
thread = threading.Thread(target=read_serial)  
thread.daemon = True  
thread.start()
```

```
def animate(i):
```

```
    with data_lock:  
        ax12.clear()  
        ax3.clear()  
        #ax4.clear()
```

```
    colors = ['blue', 'green', 'red', 'purple']
```

```
    # Plot en el eje combinado ax12  
    ax12.plot(time_data, sensor1_data, color=colors[0], label='LMT1')  
    ax12.plot(time_data, sensor2_data, color=colors[1], label='LMT2')
```

```
    ax3.plot(time_data, sensor3_data, color=colors[2], label='ACS712 (Amps)')  
    #ax4.plot(time_data, sensor4_data, color=colors[3])
```

```
    ax12.set_ylim([0, 100])  
    ax3.set_ylim([-3, 3])
```

```
    ax12.set_yticks(range(0, 70, 20), minor=False)  
    ax3.set_yticks(range(-3, 3, 1), minor=False)
```

```
    ax12.set_ylabel('Temperatura (LMT1 y LMT2)', fontsize=25)  
    ax3.set_ylabel('Corriente', fontsize=25)
```

```
    ax3.set_xlabel('Time (s)', fontsize=25)  
    ax12.set_xlim()
```

```
    ax12.grid(True)  
    ax3.grid(True)
```

```
    if sensor1_data:  
        ax12.text(time_data[-1], sensor1_data[-1], f'{sensor1_data[-1]:.2f} °C', fontsize=50,  
ha='right', va='bottom')  
    if sensor2_data:  
        ax12.text(time_data[-1], sensor2_data[-1], f'{sensor2_data[-1]:.2f} °C', fontsize=50,  
ha='right', va='bottom')  
    if sensor3_data:  
        ax3.text(time_data[-1], sensor3_data[-1], f'{sensor3_data[-1]:.2f} A', fontsize=50,  
ha='right', va='bottom')
```

```
    # Añadir la leyenda  
    ax12.legend(fontsize=25)  
    ax3.legend(fontsize=25)
```



```
# Configurar la animación
```

```
ani = animation.FuncAnimation(fig, animate, frames=10, interval=0.0001)
```

```
# Mostrar la gráfica
```

```
plt.show()
```





**ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030**

**Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.**

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

<b>Objetivos de Desarrollo Sostenibles</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>No Procede</b>
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>				
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>				
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>				
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>				
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>				
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>				
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>				
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>				
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>				
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>				
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>				
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>				
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>				

Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

\*\*\*Utilice tantas páginas como sea necesario.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ADE

Facultat d'Administració  
i Direcció d'Empreses /UPV

**Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.** (Numere la pàgina)