

Trabajo Fin de Máster

Máster en Electrónica, Robótica y Automática



Control y supervisión del sistema de propulsión de un vehículo híbrido con pila de combustible

Autor: Carlos Naz García

Tutor: Carlos Bordons Alba

Dpto. Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Máster en Electrónica, Robótica y Automática

Control y supervisión del sistema de propulsión de un vehículo híbrido con pila de combustible

Autor:

Carlos Naz García

Tutor:

Carlos Bordons Alba

Catedrático

Dpto. de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Control y supervisión del sistema de propulsión de un vehículo híbrido con pila de combustible

Autor: Carlos Naz García

Tutor: Carlos Bordons Alba

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

A mi familia
A mis amigos
A mis maestros

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres, José María y María Antonia, por darme la oportunidad de llegar hasta aquí y ser mi principal apoyo durante mi vida. A mi hermano, Álvaro, que se alegraba tanto como yo con cada una de las pequeñas victorias que iba consiguiendo. A mi novia, Marion, por ser la energía y el amor que me ha impulsado durante los momentos más difíciles de mis estudios. Y a mis amigos por hacer de la vida un camino acompañado.

No pueden faltar todos los maestros y profesores que he tenido a lo largo de mi vida como estudiante, en especial a aquellos que me han motivado y enseñado a superarme siempre. Gracias en especial a Carlos Bordons, mi profesor y también tutor de este trabajo, por su orientación, y junto a Fernando Isorna (jefe del laboratorio de energía del CEDEA, INTA) por su confianza y por darme la oportunidad de participar en este proyecto.

Por último, este proyecto no hubiese visto la luz si no fuese por mis compañeros del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, quienes me han brindado su ayuda de buena gana durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por vuestra amabilidad y vuestro interés por sacar el proyecto adelante.

Carlos Naz García

Sevilla, 2022

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es la integración de los elementos necesarios para conseguir un sistema de propulsión híbrido a base de hidrógeno mediante pila de combustible en un vehículo originalmente 100% eléctrico.

Este documento pretende mostrar el trabajo de integración realizado que comprende desde la instrumentación electrónica embarcada hasta el software de control y supervisión implementado. Además, tras analizar los resultados experimentales obtenidos, se exponen las conclusiones derivadas y se proponen distintas líneas de trabajo futuro que podrían mejorar el funcionamiento del sistema.

Este proyecto, que se ha desarrollado en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, concretamente en el Centro de Experimentación “El Arenosillo” (Huelva), se sitúa a la vanguardia de la investigación en movilidad a base de hidrógeno mediante pila de combustible y supone una excelente plataforma para el estudio de distintas tecnologías del hidrógeno, así como tipos de algoritmos para su control y supervisión.

ABSTRACT

The purpose of this project is the integration of the necessary elements to achieve a hydrogen-based hybrid propulsion system using a fuel cell in an originally 100% electric vehicle.

This document aims to show the integration work carried out, which ranges from the on-board electronic instrumentation to the implemented control and supervision software. In addition, after analysing the results obtained experimentally, the derived conclusions are presented and different lines of future work are proposed that could improve the operation of the system.

This project, which has been developed at the facilities of the National Institute of Aerospace Technology, specifically at the "El Arenosillo" Experimentation Center (Huelva), is at the forefront of research into hydrogen-based mobility using fuel cells and entails an excellent platform for the study of different hydrogen technologies, as well as types of algorithms for their control and supervision.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Introducción	2
1.1 Descripción General	2
1.2 Objetivos	4
1.3 Metodología	4
2 Estado del Arte	6
3 Caracterización de los Componentes	12
3.1 PEMFC	12
3.1.1 Datos aportados por el fabricante	12
3.1.2 Primera puesta en marcha	14
3.1.3 Caracterización tras uso prolongado	17
3.1.4 Resultados	18
3.1.5 Conclusiones	19
3.2 Convertidor DC/DC	19
3.2.1 Datos aportados por el fabricante	19
3.2.2 Metodología	20
3.2.3 Resultados	22
3.2.4 Conclusiones	28
4 Configuración de la Electrónica Embarcada	30
4.1 Ordenador de a bordo	30
4.1.1 Instalación del Sistema Operativo	30
4.1.2 Instalación Drivers	30
4.1.3 Ejecución automática	31
4.2 Tarjetas de adquisición de datos	31
4.2.1 Ajuste y calibración	32
4.2.2 Información enviada y recibida	34
5 Software de Control y Supervisión	36
5.1 LabVIEW	36
5.1.1 Funcionamiento global	36
5.1.2 Comunicación	41
5.1.3 Supervisión	42
5.1.4 Modo Auto – Control –	51
5.1.5 Modo Test	52
5.1.6 Guardado de datos	53
5.2 Excel	55
5.2.1 Tratamiento de los datos	55
5.2.2 Visualización de la información	56
6 Implementación en el Vehículo	58
6.1 Pantalla	58

6.2	<i>Caja de control</i>	59
6.2.1	Disposición de componentes	60
6.2.2	Conexionado	61
6.3	<i>Componentes del sistema de propulsión híbrido</i>	63
6.4	<i>Software de control y supervisión</i>	64
6.5	<i>Resultados experimentales</i>	64
6.5.1	Modo Auto	64
6.5.2	Modo Test	67
6.5.3	Carga de baterías	68
6.5.4	Perfiles de conducción	70
6.5.5	Rendimientos	71
7	Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación	74
7.1	<i>Conclusiones</i>	74
7.2	<i>Líneas futuras de investigación</i>	75
Anexos		76
A1	<i>Manual de Usuario</i>	76
A2	<i>Comandos de configuración de TADs</i>	96
A3	<i>Guardado de datos</i>	98
A4	<i>Código VBA en Excel</i>	100
Referencias y Bibliografía		108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Características técnicas Nexa 1200	13
Tabla 2 – SetPoints para curva de polarización	17
Tabla 3 - Drivers instalados en ordenador de a bordo	31
Tabla 4 - Tarjetas de adquisición de datos	31
Tabla 5 - Niveles de potencia en Modo Automático	38
Tabla 6 - Entradas/Salidas Puerto Serie	41
Tabla 7 - Entradas/Salidas CANBus	42
Tabla 8 – Conversiones información de TADs	43
Tabla 9 – Información en Pantalla Principal	44
Tabla 10 - Información en Pantalla Inicio	45
Tabla 11 - Información en Pantalla PEMFC	46
Tabla 12 - Información en Pantalla Tanque H2	47
Tabla 13 - Información en Pantalla DC/DC	48
Tabla 14 - Información en Pantalla Error	49
Tabla 15 - Información en Pantalla Test	50
Tabla 16 – Entradas/Salidas Modo Auto -Control-	52
Tabla 17 – Entradas/Salidas Modo Test	53
Tabla 18 – Entradas/Salidas Bucle guardado de dato	53
Tabla 19 – Información almacenada en .txt	54
Tabla 20 - Información graficada automáticamente	56
Tabla 21 – Componentes en caja de control	59
Tabla 22 – Cableado E/S analógicas	62
Tabla 23 – Componentes del sistema de propulsión híbrido	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Estado original Melex	3
Figura 2 – Esquema de potencia del Melex	3
Figura 3 – Fases de carga de baterías plomo-ácido	5
Figura 4 – Emisiones de CO ₂ entre 1995 y 2021 [2]	6
Figura 5 - Emisiones por tipo de vehículo y su predicción [3]	7
Figura 6 - Evolución de la producción de coches eléctricos en el mundo [5]	7
Figura 7 - Vehículos con pila de combustible por región [6]	8
Figura 8 – Curva polarización teórica Nexa® 1200	14
Figura 9 – Componentes para caracterización de la pila de combustible	15
Figura 10 – Detalle de carga electrónica y fuente de alimentación	15
Figura 11 – Detalle del conexionado de la FC en el laboratorio	15
Figura 12 – 1ª Puesta en marcha de la pila de combustible	16
Figura 13 – Curva de polarización de la 1ª puesta en marcha	16
Figura 14 – Caracterización final de la pila de combustible	18
Figura 15 – Curva de polarización final	18
Figura 16 – Interfaz para control de TADs en el laboratorio	20
Figura 17 – Elementos para caracterización del BEV4	21
Figura 18 – Detalle conexionado de TADs en laboratorio	21
Figura 19 – Prueba de regulación en Vout con Iout constante	22
Figura 20 - Prueba de regulación en Vout con Iout variable	23
Figura 21 - Prueba de regulación en Iin con Iout constante	24
Figura 22 - Prueba de regulación en Iin con Iout variable	25
Figura 23 - Prueba de regulación en Vout e Iin con Iout constante	26
Figura 24 - Prueba de regulación en Vout e Iin con Iout variable	27
Figura 25 - Rendimiento del convertidor DC/DC BEV4	28
Figura 26 – Detalle cableado TADs durante su configuración	32
Figura 27 - Detalle conversión a USB de Comunicación Serie de TADs	32
Figura 28 – Configuración TADs –Puerto COM–	33
Figura 29 – Configuración TADs –Parámetros–	33
Figura 30 - Detalle calibración TADs	34
Figura 31 - Diagrama de flujo global	40
Figura 32 – Pantalla Principal	44
Figura 33 - Pantalla Inicio	45
Figura 34 – Pantalla PEMFC	46
Figura 35 – Pantalla Tanque H ₂	47

Figura 36 – Pantalla DC/DC	48
Figura 37 – Pantalla Error	49
Figura 38 – Pantalla Test	50
Figura 39 - Perfil de control de carga de baterías	51
Figura 40 - Detalle interfaz en Excel	55
Figura 41 - Soporte de pantalla para implementación	58
Figura 42 – Configuración de la caja de control original	60
Figura 43 - Configuración actual de la caja de control	60
Figura 44 – Esquema de conexionado de la caja de control	61
Figura 45 - Instalación del .exe de control y supervisión	64
Figura 46 - Resultados experimentales en Modo Auto en conducción	65
Figura 47 – Resultados Modo Auto según rango de carga	66
Figura 48 - Resultados experimentales en Modo Test en conducción	67
Figura 49 - Resultados experimentales prueba carga de baterías	68
Figura 50 - Evolución depósito H2 durante carga de baterías	69
Figura 51 - Perfil de conducción en modo rápido	70
Figura 52 - Perfil de conducción en modo lento	70
Figura 53 – Rendimiento del circuito de potencia	72

NOTACIÓN

INTA	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
CEDEA	Centro de Experimentación “El Arenosillo”
PEMFC	Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
FC	Pila de combustible (Fuel Cell)
OCV	Voltaje a circuito abierto (Open Circuit Voltage)
TAD	Tarjeta de Adquisición de Datos
CAN	Controller Area Network. Protocolo de comunicación
ISO	International Organization for Standardization
SOC	Estado de carga de baterías (State Of Charge)
VBA	Visual Basic for Applications.
V_{DC}	Tensión en corriente continua
U_{inSP}	SetPoint de la tensión de entrada del convertidor
U_{outSP}	SetPoint de la tensión de salida del convertidor
I_{inSP}	SetPoint de la corriente de entrada del convertidor
I_{outSP}	SetPoint de la corriente de salida del convertidor
U_{inAV}	Valor de la tensión en bornes de entrada del convertidor
U_{outAV}	Valor de la tensión en bornes de salida del convertidor
I_{inAV}	Valor de la corriente en bornes de entrada del convertidor
I_{outAV}	Valor de la corriente en bornes de salida del convertidor
P_{in}	Potencia eléctrica a la entrada del convertidor
P_{out}	Potencia eléctrica a la salida del convertidor
P_{FC}	Potencia eléctrica a la salida de la pila de combustible
P_{H_2}	Potencia teórica de la pila calculada a partir de la energía contenida en el H_2 consumido
η_{CONV}	Rendimiento del convertidor
η_{FC}	Rendimiento de la pila de combustible
η_{Pot}	Rendimiento del circuito de potencia
η_{SPH_2}	Rendimiento del sistema completo de propulsión a base de hidrógeno

1 INTRODUCCIÓN

No me importa caminar. No hay distancias cuando se tiene un motivo.

- Jane Austen -

En este capítulo se pretende poner de manifiesto el punto de partida del proyecto realizado a fin de comprender la motivación del desarrollo realizado. Además, se exponen los objetivos propuestos y se detalla la metodología seguida para su consecución.

Puesto que se parte de un vehículo eléctrico enchufable totalmente funcional, que en su día también funcionó de manera híbrida con un sistema de propulsión de hidrógeno, el primer paso ha sido la recopilación y análisis de la documentación existente.

1.1 Descripción General

El desarrollo de este proyecto tiene como base el vehículo eléctrico enchufable *Melex*. Este vehículo se encuentra en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial ubicado en el Centro de Experimentación “El Arenosillo”, en Huelva.

El *Melex* es un vehículo destinado a la movilidad interna tanto para los trabajadores como para las numerosas vistas que se reciben en el INTA, sirviendo como prototipo de muestra de un vehículo para movilidad mediante energías alternativas.

Si bien este automóvil al comienzo de este proyecto era funcional únicamente en modo eléctrico enchufable, en su día fue adaptado para utilizar un sistema de propulsión con pila de combustible. Por este motivo, el vehículo tiene instalados los componentes necesarios para dicho fin, como son la FC junto con su electrónica de potencia, un convertidor DC/DC que adecúa las tensiones de la pila y baterías, el tanque de hidrógeno junto con las canalizaciones para recarga y distribución y la electrónica embarcada necesaria para su operación.



Figura 1 – Estado original Melex

Tras analizar la documentación existente, se observa que se trata de un vehículo de tipo *Range Extender*, es decir, que el sistema de propulsión híbrido a base de hidrógeno actúa como suministrador de potencia al sistema de baterías y a la carga dependiendo del uso que se le dé al automóvil. El esquema de potencia que sigue el Melex se muestra en el siguiente diagrama.

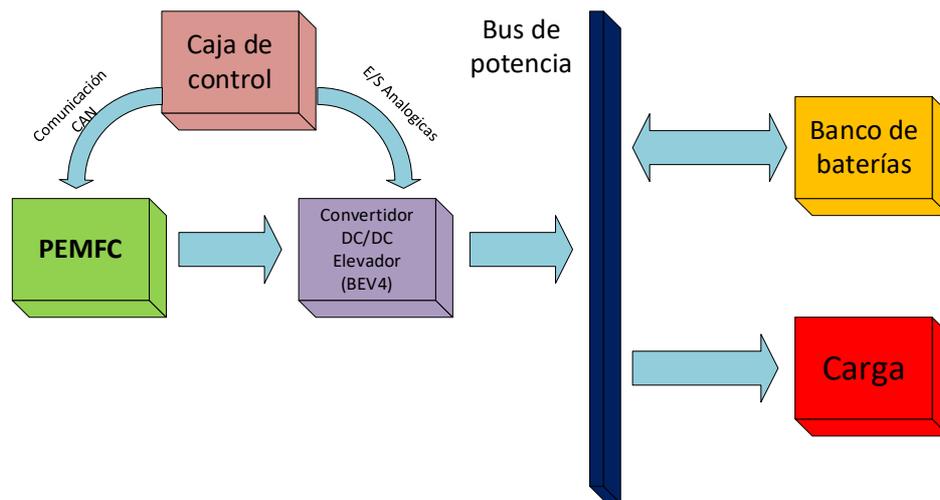


Figura 2 – Esquema de potencia del Melex

En cuanto a la electrónica embarcada para el control y la supervisión del sistema híbrido, ubicada en la denominada *caja de control*, en un principio se creía que el problema era que alguno de los dos ordenadores de a bordo que llevaba había dejado de funcionar y que con cambiarlo e implementar un nuevo control, sería suficiente.

Tras analizar los componentes de la caja de control uno a uno, se concluye que la mayoría están inutilizables y que hay que renovar toda la electrónica de control y supervisión (ordenador de a bordo, sistemas de adquisición de datos, software, alimentaciones, etc.).

1.2 Objetivos

El objetivo principal es hacer que el Melex sea completamente funcional como vehículo híbrido enchufable con pila de combustible.

Puesto que se determina que la electrónica para el control y supervisión debe ser renovada por completo, uno de los objetivos es hacer que la configuración de la caja de control quede lo más simplificada posible. Esto se debe a que la distribución y cableado original de la caja de control era maraña casi impenetrable de la cual se disponía escasamente de documentación. Esto ha llevado a un largo proceso de ingeniería inversa para comprender, con la profundidad necesaria, la función de cada elemento y así ser capaz de integrar nuevos componentes sin perder funcionalidades.

Como consecuencia de la renovación de la electrónica embarcada, se propone realizar en un solo ordenador de a bordo toda la programación del sistema de control y supervisión. Esto, aparte de facilitar el mantenimiento en la caja de control, también simplifica la comprensión e implementación del software, ya que se realiza todo en el mismo lenguaje de programación, en particular, LabVIEW.

Por último, pero no por ello menos importante, es conseguir que todo el trabajo de ingeniería que se lleve a cabo de control y supervisión se muestre al usuario del vehículo a través de una interfaz lo más intuitiva posible, que ofrezca la máxima información posible del funcionamiento del sistema de propulsión de una forma fácil de comprender puesto que el Melex no deja de ser un automóvil de exposición para personas ajenas a su desarrollo.

1.3 Metodología

Una vez establecidos los objetivos a alcanzar, el siguiente paso es determinar la metodología a seguir para lograr los resultados deseados.

En primer lugar, es necesario llevar a cabo una caracterización en el laboratorio de los componentes del sistema de propulsión híbrido (pila de combustible y convertidor DC/DC), ya que tras unos 6 años sin uso es imperativo conocer su estado real para su posterior utilización. Si tras obtener la caracterización se demuestra que siguen en condiciones para su uso, se integrarán de nuevo en el vehículo.

En segundo lugar, la elección de la nueva electrónica embarcada debe hacerse en base a los elementos que se vayan a integrar en el Melex. Así, requiere de un sistema de adquisición de datos capaz de recibir y enviar información en el rango de 0...10V, una pantalla con una interfaz amigable para el usuario y un ordenador de a bordo con capacidad de tratamiento de datos, temporización eficaz para el control y posibilidad para conectar la pantalla que proporcione la supervisión del sistema.

Una vez escogida la instrumentación electrónica, es fundamental desarrollar la programación de control y supervisión teniendo presente la funcionalidad los elementos del sistema de propulsión, como la pila de combustible, el convertidor DC/DC o las baterías.

En base a los datos obtenidos de la caracterización de la PEMFC y del convertidor se deben ajustar los parámetros de funcionamiento de éstos, de manera que ambos puedan operar en su punto óptimo, evitando un uso que pueda suponer un riesgo para el usuario o para los propios equipos.

También hay que tener en cuenta las fases de carga y descarga de las baterías a la hora de implementar el código para el control del sistema de propulsión, puesto que su función es la de suministrar potencia a las baterías. Para ello se desarrolla el control conforme a la información aportada por el fabricante y a la curva típica de carga para las baterías de plomo-ácido integradas en el vehículo.

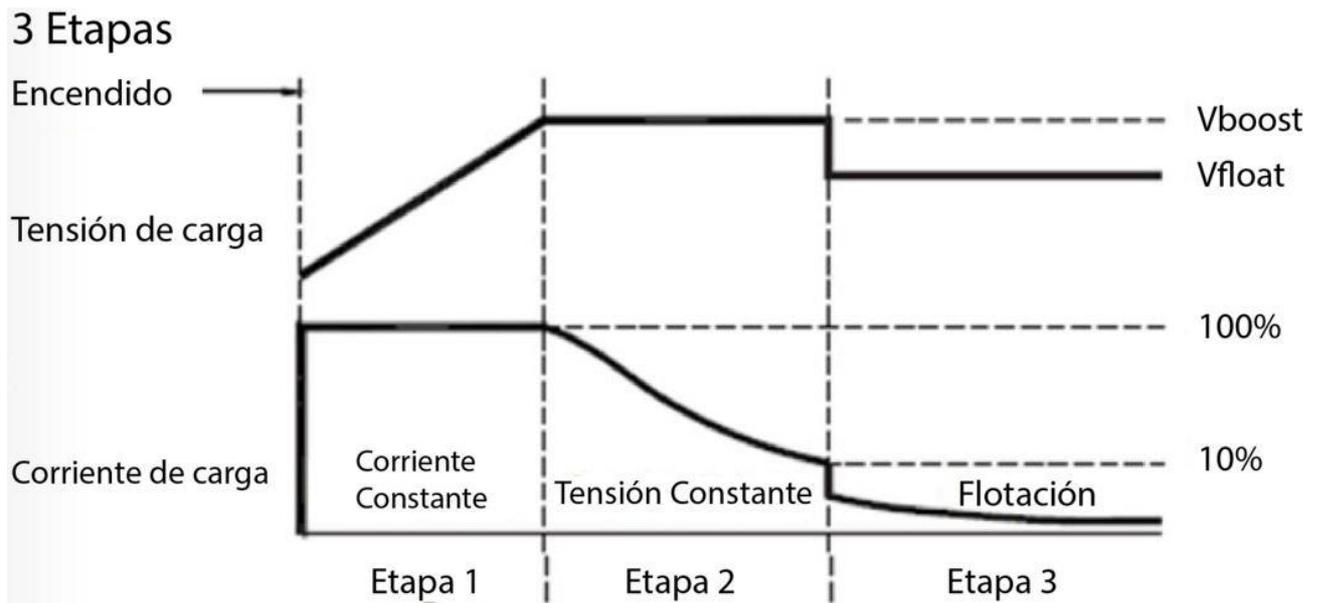


Figura 3 – Fases de carga de baterías plomo-ácido

Por último, la integración de todo el sistema debe llevarse a cabo respetando las condiciones de operación de cada componente para que las pruebas realizadas en el laboratorio y el software de control y supervisión puedan ser validados de manera experimental. De esta forma se garantiza que el Melex será completamente funcional como un vehículo híbrido enchufable con pila de combustible.

2 ESTADO DEL ARTE

La ciencia más útil es aquella cuyo fruto es el más comunicable

Leonardo Da Vinci

En este capítulo se pretende exponer la situación actual de la tecnología de pilas de combustible en su aplicación para la movilidad con el fin de poner en contexto el proyecto realizado, obteniendo una visión general del uso de hidrógeno como combustible en relación con el uso de energías alternativas no contaminantes en vehículos.

Los estudios hasta la fecha ponen de manifiesto que nuestro planeta va a ser incapaz de soportar la demanda casi exponencial de energía, ya que vivimos en un entorno cerrado con recursos limitados. La revolución industrial supuso un punto de inflexión potenciando la producción y el transporte haciendo uso de los combustibles fósiles como fuente de energía. Este cambio propició una explosión demográfica nunca vista, incrementado aún más el consumo energético. A este ritmo, se prevé que los combustibles fósiles se agoten en unos dos siglos, lo que supone un plazo insignificante comparado con el tiempo que ha tardado en producirse [1]

Por este mismo motivo y por la contaminación que provocan, es necesario reducir las emisiones de CO_2 y demás gases contaminantes responsables del efecto invernadero mediante alternativas en la producción y consumo de la energía. Las estadísticas muestran un crecimiento que se pronostica siga con la misma tendencia positiva. En el periodo de 1995 a 2021 podemos observar en la siguiente figura la evolución de emisiones de CO_2 en miles de millones de toneladas emitidas a la atmósfera [2]. La disminución sufrida en 2020 se debe a la paralización global (sobre todo del transporte) sufrida por la pandemia del Covid-19.

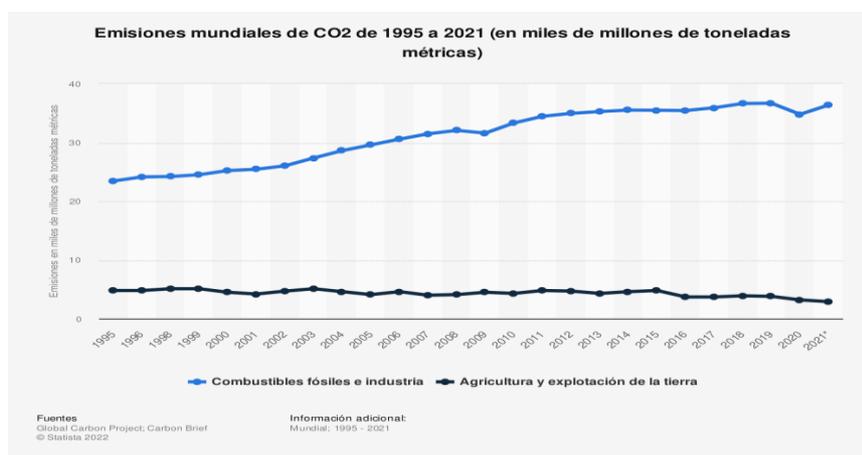
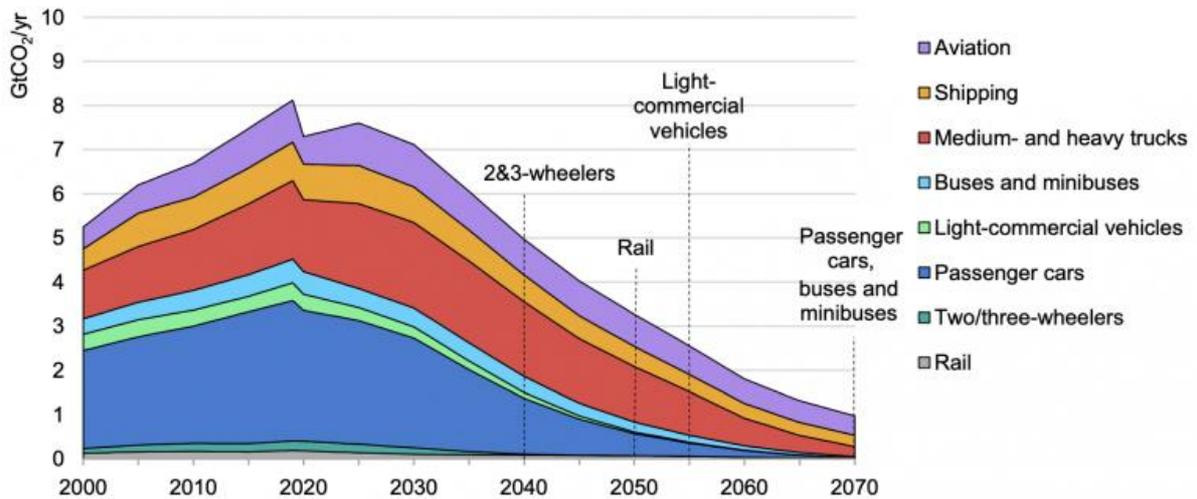


Figura 4 – Emisiones de CO_2 entre 1995 y 2021 [2]

Las necesidades de la población han promovido el uso del transporte, que representa en torno al 25% de las emisiones de dióxido de carbono y como se muestra en la siguiente gráfica, así se reparte el peso de cada tipo de transporte y su previsión en el futuro.

Figure 3.16 Global CO₂ emissions in transport by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Dotted lines indicate the year in which various transport modes have largely stopped consuming fossil fuels and hence no longer contribute to direct emissions of CO₂ from fossil fuel combustion. Residual emissions in transport are compensated by negative emissions technologies, such as BECCS and DAC, in the power and other energy transformation sectors.

Figura 5 - Emisiones por tipo de vehículo y su predicción [3]

Los viajes por carretera representan las tres cuartas partes de las emisiones del transporte. La mayor parte proviene de los vehículos de pasajeros, automóviles y autobuses, que contribuyen con el 45,1%. El otro 29,4% proviene de camiones que transportan carga. Dado que todo el sector del transporte representa el 21 % de las emisiones totales y el transporte por carretera representa las tres cuartas partes de las emisiones del transporte, el transporte por carretera representa el 15 % de las emisiones totales de CO₂ [4]

Para afrontar este dilema, recientemente se está experimentando un auge en la producción global de vehículos eléctricos, como puede verse en imagen a continuación.

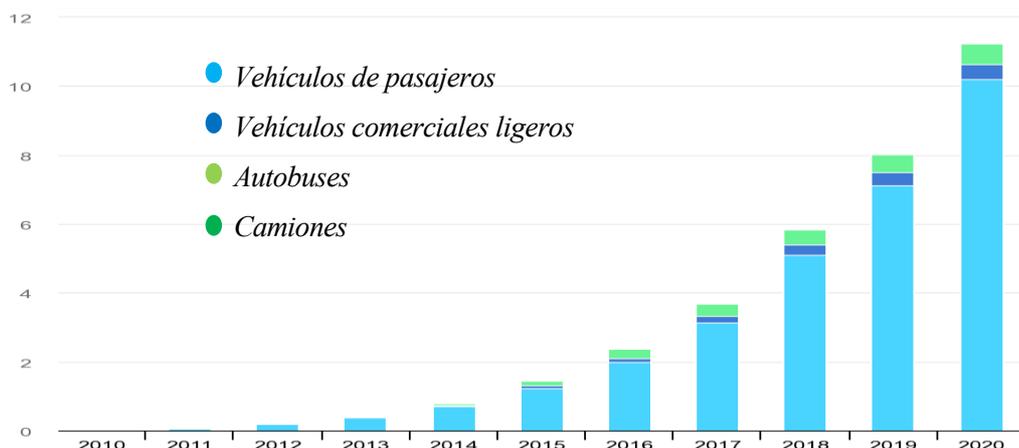


Figura 6 - Evolución de la producción de coches eléctricos en el mundo [5]

Parte de estos vehículos eléctricos son un tipo específico que resulta de interés para el proyecto que se expone en este documento, los vehículos con pila de combustible. Estos son todavía minoritarios en cuanto a producción y venta, pero el número va en aumento en determinados sitios como se muestra en la siguiente gráfica.

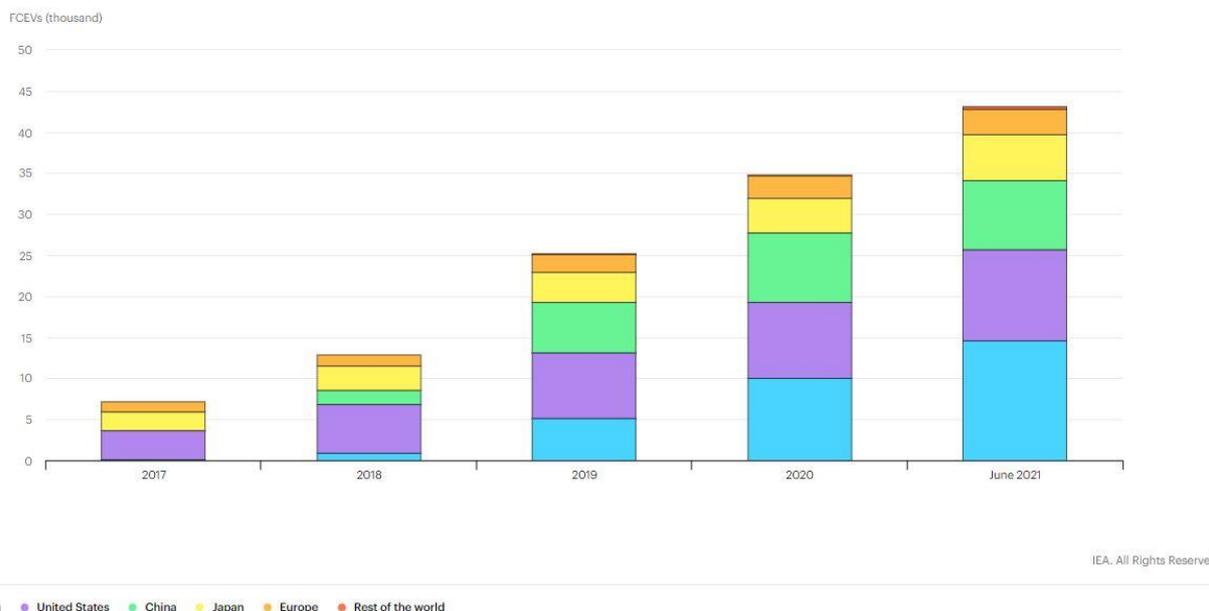


Figura 7 - Vehículos con pila de combustible por región [6]

Los vehículos propulsados por hidrógeno constituyen la nueva generación de vehículos eléctricos. Esta tecnología de vanguardia se basa en una reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno en el interior de las pilas de combustible, en lugar de en la combustión de combustibles fósiles. Aunque en sus comienzos fue desarrollada para propulsar naves espaciales, actualmente las pilas de combustible tienen un potencial de aplicación mucho más amplio. Según los datos de *Anfac*, en Europa, a datos de 2020, ya había 2.453 unidades de vehículos de hidrógeno de los cuales, sólo 15 están en España y ni una sola hidrogenera pública.

En cuanto a la pila de combustible utilizada, las pilas tipo PEM se presentan como las favoritas para la aplicación en vehículos por una variedad de razones como su relativamente baja temperatura de operación (50...100 °C), su rápido arranque, alta eficiencia (30...50%) y densidad de potencia, baja degradación por corrosión y por presentar un buen nivel de robustez del sistema.

Como puede comprobarse, la movilidad basada en hidrógeno con pila de combustible es un tema de máxima actualidad tanto en la industria como en la investigación, ya que cada día se publican artículos relacionados con las pilas o sus aplicaciones. Sólo en el último año en torno a 3.000 publicaciones, que cubren desde materiales de fabricación al control de los distintos parámetros de un vehículo con celda de combustible.

Se puede concluir que este proyecto, por tanto, se desarrolla en el marco del estado del arte de la investigación, ya que, se aborda desde la caracterización de los componentes hasta la implementación de un sistema de control y supervisión del sistema de propulsión a base de hidrógeno de un vehículo híbrido.

3 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

En este capítulo se describen los pasos seguidos para obtener la caracterización de los componentes que serán instalados posteriormente en el vehículo. El objetivo de este proceso de caracterización, tanto individual como en grupo, de dichos componentes es necesario para comprender el funcionamiento y las peculiaridades de éstos para asegurar que una vez implementados en el vehículo se obtiene el comportamiento esperado.

3.1 PEMFC

La pila de combustible de membrana de intercambio de protones (*PEMFC* por sus siglas en inglés) NEXA 1200 es el elemento principal del sistema de propulsión híbrida basado en hidrógeno que se quiere introducir en el vehículo. Por ello, debe ser correctamente caracterizada a fin de tener toda la información posible a la hora de ponerla en uso.

La PEMFC ha estado sin uso durante un largo período de tiempo (unos 4 años) y no se han respetado las condiciones de temperatura y humedad que marca el fabricante, puesto que ha estado a la intemperie. Estas condiciones denotan la necesidad de no tomar por válidos los datos que nos ofrece el fabricante, vistos en el apartado 3, y realizar una caracterización de la pila de combustible que nos ofrezca información actualizada de su estado real.

A través de la caracterización de la pila se obtiene su curva de polarización. En ella se observa la relación entre el voltaje y la corriente producidos, de donde se obtiene la potencia que es capaz de generar en cada punto de funcionamiento de dicha curva.

3.1.1 Datos aportados por el fabricante

La pila Nexa® 1200 es una unidad de celda de combustible completa que, con un voltaje de salida entre $20...36V_{DC}$ y una corriente de salida máxima de 60A a temperaturas de entre $5...25\text{ }^{\circ}\text{C}$, entrega una potencia de salida de 1200 W. El voltaje de salida disminuye al aumentar la potencia y la corriente admisible disminuye con el aumento de la temperatura ambiente en una proporción de $1\text{ A}/1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La Nexa 1200 incluye un apilamiento de celdas de combustible tipo PEM que es enfriada por aire mediante ventiladores integrados. Además, se incluyen los componentes periféricos necesarios para su correcto funcionamiento (relé de carga, diodo de seguridad con disipador de calor y válvula solenoide para hidrógeno).

El fabricante nos ofrece también las características del sistema completo que se muestran en la siguiente tabla.

Designación	Definición	Especificación
Datos físicos	Dimensiones (H x W x D)	220 x 400 x 550 mm
	Peso	22 kg
	Tipo de protección	IP22
Potencia de salida	Tensión de salida	20...36 V_{DC}
	Corriente nominal	65 $A_{DC} max$
	Salida nominal	1200 W a 5...25 °C
	Salida nominal	1000 W a 35 °C
Combustible		H ₂ , gas de hidrógeno
	Pureza mínima	99.99%
	Presión de entrada admitida	1... 15 bar
	Consumo de H ₂ en 1200W	15 NL/min
Suministro eléctrico	Potencia mínima de entrada	110 WDC
	Fuente de alimentación	12...36 V_{DC}
Oxidante	Oxígeno	Oxígeno atmosférico
	Caudal de volumen	Max 335 m^3/h
	Concentración en aire	Min 18%
	Presión ambiental	700...1100 mbar
	Temperatura	5...35 °C
	Vapor de agua en los gases de salida a potencia nominal	550 g/h
Entorno de operación	Ubicación de operación	Seco, Interior de laboratorio
	Temperatura ambiente	5... 35 °C
	Humedad relativa	0... 95%, sin condensación
Almacenamiento	Temperatura ambiente	3...35 °C

Tabla 1 – Características técnicas Nexa 1200

Así mismo, se facilita también la curva de polarización teórica de la pila de combustible como puede verse en la imagen a continuación.

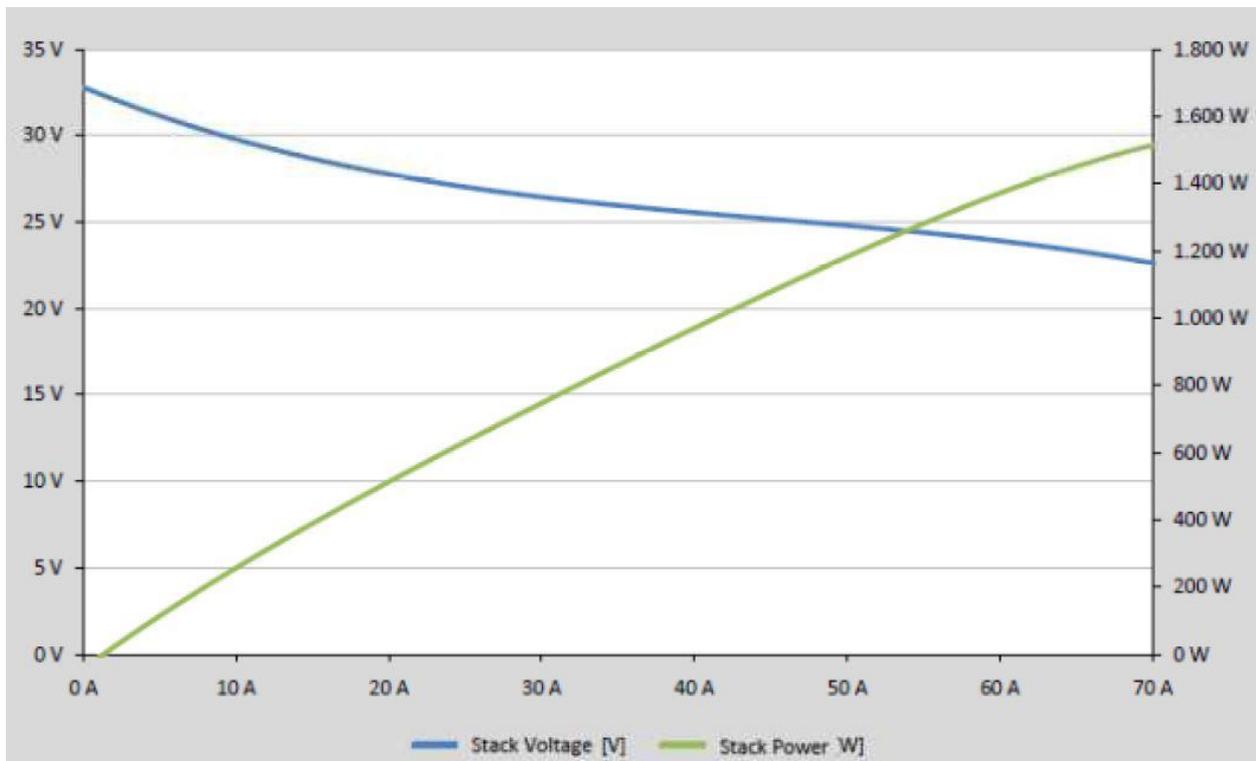


Figura 8 – Curva polarización teórica Nexa® 1200

3.1.2 Primera puesta en marcha

La caracterización de la FC se ha llevado a cabo en dos tiempos. Como se ha comentado anteriormente, la pila llevaba un largo periodo de tiempo en desuso, por lo que la curva de polarización que se obtiene al poner en marcha la PEMFC por primera vez no se ajusta a la realidad de funcionamiento de ésta una vez se lleve a cabo su integración en el vehículo. A sabiendas de ello, se muestra en este documento el desarrollo de las pruebas y los resultados obtenidos a fin de profundizar en el conocimiento del funcionamiento de las pilas de combustible y poder observar la evolución de ésta tras su uso continuado.

Al tratarse de la primera prueba de funcionamiento de la PEMFC, el proceso de obtención de la curva de polarización se lleva a cabo atendiendo a criterios de puesta en marcha suave. De esta manera, se consigue que la pila vaya generando potencia lentamente mientras se garantiza el correcto funcionamiento de la misma.

Para esta primera caracterización, se establece que se darán escalones de corriente de un amperio y se mantendrá dicha intensidad durante tres minutos. Este proceso de demanda de corriente con escalones tan pequeños y mantenidos durante un periodo relativamente largo para una caracterización es por ser la primera puesta en marcha tras un tiempo inactiva.

En esta prueba se pretende conocer hasta dónde puede llegar la pila generando potencia, por lo que se tiene en cuenta el voltaje mínimo al que puede llegar la FC (20 Voltios) para que no sufra daño.

A continuación, se muestra la configuración de los elementos durante la prueba realizada en el laboratorio.



Figura 9 – Componentes para caracterización de la pila de combustible

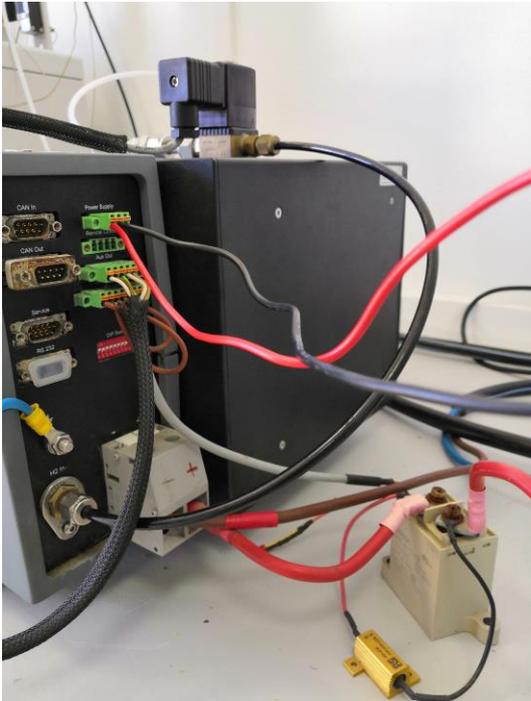


Figura 11 – Detalle del conexionado de la FC en el laboratorio



Figura 10 – Detalle de carga electrónica y fuente de alimentación

3.1.2.1 Resultados

En las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos experimentalmente.

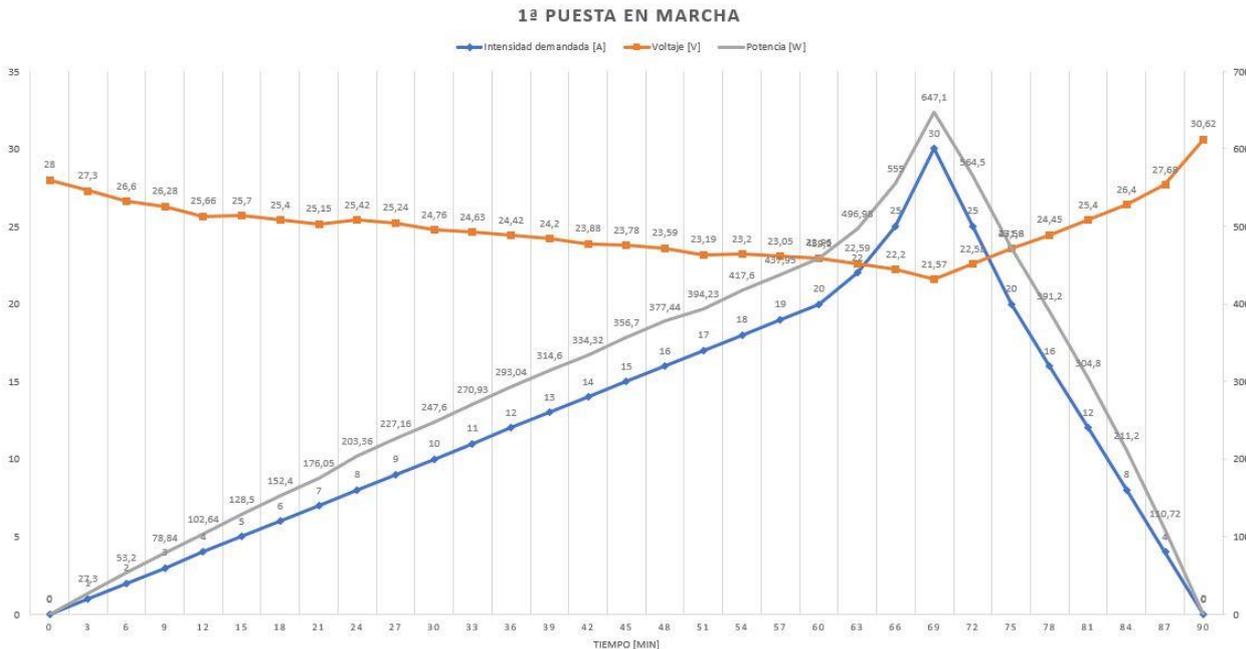


Figura 12 – 1ª Puesta en marcha de la pila de combustible

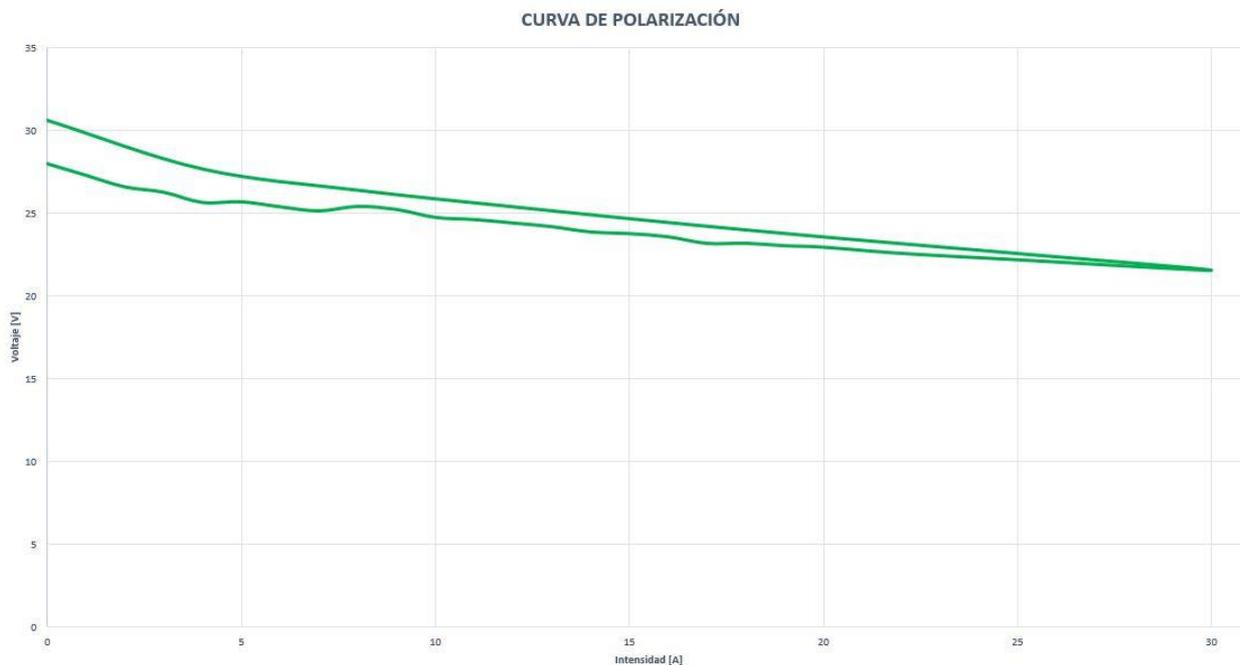


Figura 13 – Curva de polarización de la 1ª puesta en marcha

Como puede verse, se comienza en OCV (Open Circuit Voltage) sin demanda de corriente y se va aumentando progresivamente de uno en uno los amperios solicitados por la carga electrónica. De esta manera se le da tiempo a la pila de combustible para que se establezca en un valor de tensión constante.

Se alcanza el máximo de intensidad a los 30 amperios, con una tensión de 21 voltios, valor bastante alejado de los 60 amperios máximos según los datos aportados por el fabricante.

Una vez se alcanza el máximo de potencia que puede generar atendiendo al voltaje mínimo de funcionamiento de la pila, se comienza un descenso escalonado de igual modo para la subida, aunque con escalones mayores puesto que la disminución de la demanda de corriente no requiere tanto esfuerzo para la pila. Igualmente, la bajada escalonada permite la recuperación parcial de la pila, como se puede observar en el valor final de OCV en la primera gráfica o en la curva de polarización superior en la segunda imagen.

3.1.3 Caracterización tras uso prolongado

Como se ha comentado anteriormente, antes de integrar la PEMFC en el sistema de propulsión híbrido del vehículo, es necesario conocer su funcionamiento dependiendo del punto de operación, o lo que es lo mismo, su curva de polarización.

Los datos que se muestran en este apartado se han obtenido tras haber utilizado la pila durante varios meses, por lo que se considera que el proceso de recuperación de esta ha finalizado y los valores que se obtengan de una caracterización serán los más parecidos a la realidad del funcionamiento una vez se implemente en el vehículo.

La obtención de la curva de polarización, puesto que se considera que la FC trabaja en sus valores estándar, se lleva a cabo basándose en el draft '*Test Module TM PEFC ST 5-3, Version 1.5*' que se inspira en las *normas IEC 62282-5, EC 60050-485*. Se acude a normativa para caracterización y seguridad de pilas de combustible con el fin de obtener valores estandarizados para la industria, que sirven de ayuda para poder comparar los datos obtenidos de la Nexa 1200 con otras posibles pilas de combustible.

En este draft se establece que la manera ideal de obtener la curva de polarización de una pila tipo PEM es dividir el rango máximo de corriente que puede suministrar la pila en 15 escalones. No se menciona nada en cuanto al tiempo que se debe permanecer en cada escalón, pero con la experiencia previa adquirida con esta pila, se establece en dos minutos el tiempo entre escalones.

En la tabla a continuación se muestran los valores objetivo de corriente solicitada para la prueba.

Escalón	Intensidad demandada [A]
0	0 OCV
1	4.3
2	8.6
3	12.9
4	17.2
5	21.5
6	25.8
7	30.1
8	34.4
9	38.7
10	43
11	47.3
12	51.6
13	55.6
14	60

Tabla 2 – SetPoints para curva de polarización

Para obtener los datos se ha hecho uso del software implementado en el ordenador de a bordo del vehículo programado en LabVIEW que se explica en el capítulo 5.

3.1.4 Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas.

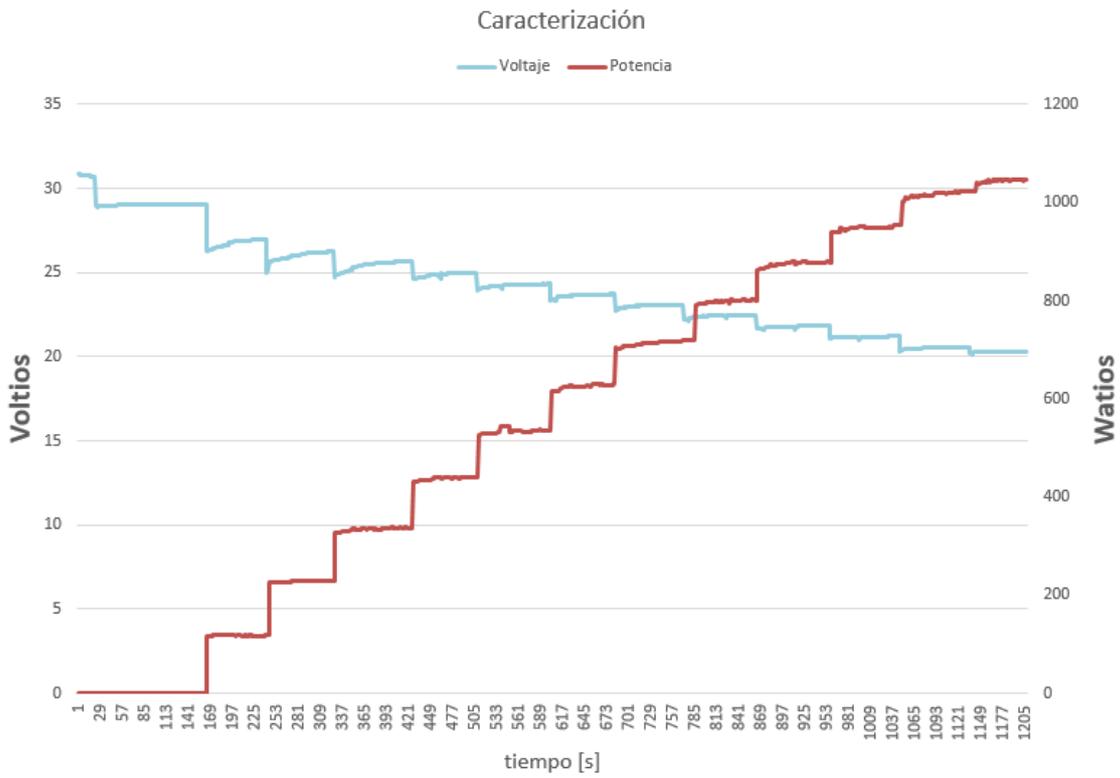


Figura 14 – Caracterización final de la pila de combustible

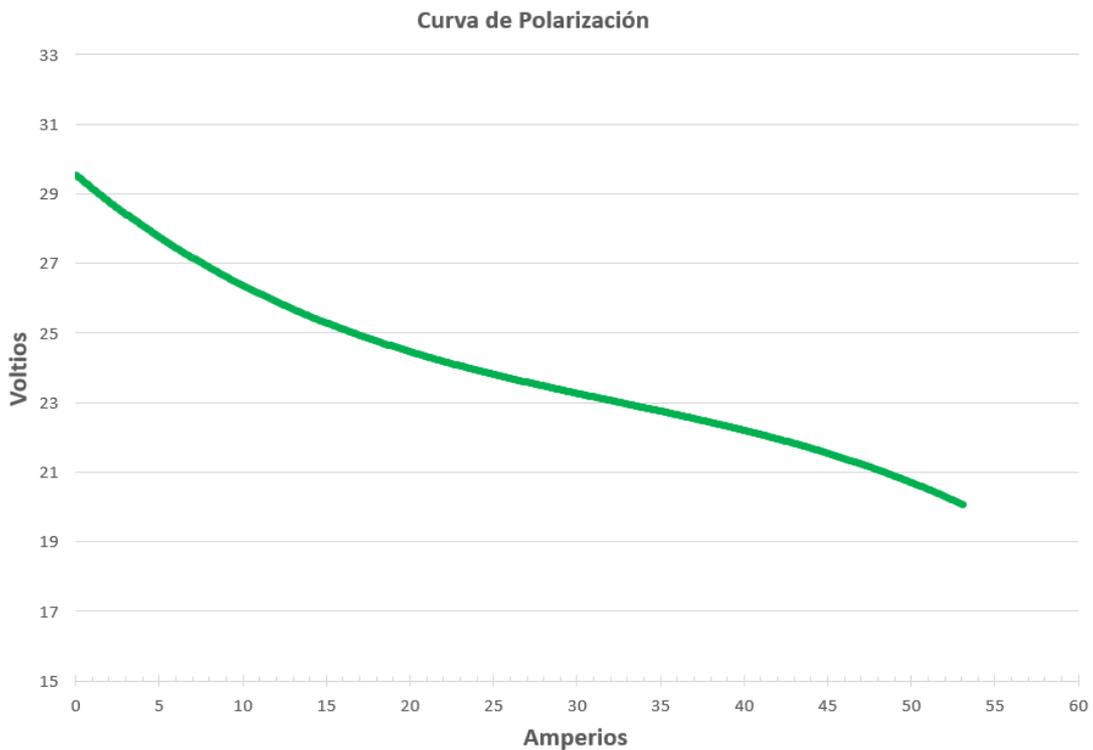


Figura 15 – Curva de polarización final

3.1.5 Conclusiones

La recuperación que se aprecia entre la primera prueba de funcionamiento y la caracterización final es fruto de la re-humidificación de las membranas de la pila, que tras haber estado un largo periodo de tiempo a la intemperie y sin uso se ven afectadas perdiendo capacidad de generación.

Como puede observarse, tras mostrar los resultados de ambas caracterizaciones, la primera puesta en marcha y una vez la pila ya está recuperada, sigue siendo evidente la pérdida de capacidad para generar potencia de la pila con respecto a la documentación del fabricante. Esto puede ser debido a varios factores, pero mayoritariamente se debe a las condiciones de almacenamiento a las que ha estado sometida la pila y al tiempo que ésta ha estado en completo desuso.

3.2 Convertidor DC/DC

El otro componente fundamental, para este vehículo en particular, es el convertidor DC/DC. Es un elemento indispensable, puesto que es el encargado de adecuar la tensión de salida de la pila de combustible a la tensión de las baterías. Hay que tener en cuenta, además, que la tensión de la pila es dinámica y va cambiando en función a la demanda de potencia establecida, por lo que el convertidor debe ser capaz de ajustarse a dicha dinámica y tener la capacidad de seguir manteniendo la regulación bajo control para no dañar ningún componente tanto aguas arriba como abajo del bus de potencia.

3.2.1 Datos aportados por el fabricante

El convertidor utilizado es el *DC/DC Elevador Unidireccional BEV4* de la marca alemana *Brandner Gruppe*. Es capaz de manejar una potencia máxima de hasta 4kW, admitiendo un voltaje a la entrada de entre $20 \dots 80V_{DC}$ y una salida de hasta $100V_{DC}$.

En caso de que el voltaje a la entrada sea inferior a $20V_{DC}$, el convertidor entra en modo bypass, haciendo que actúe como un puente entre la entrada y la salida, lo que causa que el convertidor no regule.

Para el control del convertidor es necesaria una alimentación auxiliar de $12V_{DC}$. Ese voltaje alimenta una unidad de ventiladores y un convertidor CC/CC aislado integrado que proporciona la regulación y el control de los semiconductores de potencia.

Los valores de referencia para la regulación de entrada y salida se ajustan mediante setpoints analógicos de $0 \dots 10V$. Los valores reales medidos en bornes del convertidor son proporcionados mediante valores analógicos también de $0 \dots 10V$.

El convertidor elevador siempre regula sobre el parámetro $(U_{in}/U_{out}/I_{in}/I_{out})^1$ alcanzado primero, siendo posible regular en cualquiera de estos parámetros.

Hay que tener en cuenta que todos los parámetros son un valor máximo excepto U_{in} que es un valor mínimo, esto quiere decir que en caso de alcanzarse cualquier de los valores máximos, el convertidor hará que se mantenga en el valor establecido, mientras que para U_{in} , si el valor medido es menor que el Setpoint establecido el convertidor entra en modo bypass puesto que se considera una maniobra de seguridad. Por ello, normalmente se establecerá el valor de U_{in} en el límite inferior de funcionamiento del convertidor ($20V_{DC}$).

En la hoja de datos del convertidor se detalla el protocolo a seguir para la puesta en marcha del convertidor:

1. Conectar terminales de entrada de potencia del convertidor (no suministrar tensión aun) intercalando fusible adecuado.
2. Conectar alimentación de 12V para la electrónica de control (setpoints, valores en bornes, ON/OFF), (no activar nada aun).
3. Conectar terminales de salida de potencia del convertidor (no activar la carga aun) intercalando fusible

¹ U_{in} → Tensión de entrada U_{out} → Tensión de salida I_{in} → Corriente de entrada I_{out} → Corriente de salida

adecuado.

4. Asegurarse que la entrada ON/OFF está en la posición de OFF.
5. Establecer tensión en la entrada de potencia, y activar la carga.
6. Activar alimentación de 12V.
7. Ajustar referencias.
8. Habilitar ON.

3.2.2 Metodología

La estrategia seguida para llevar a cabo la caracterización del BEV4 se enfoca de manera que se pueda comprobar que los datos aportados por el fabricante siguen estando vigentes.

Para ello, se desarrolla un programa en LabVIEW que sea capaz de controlar los Setpoints de tensión e intensidad y de leer los valores en bornes que nos proporciona el convertidor. Puesto que se necesitan valores analógicos tanto para el control como para la lectura de las mediciones, se hace uso de unas tarjetas de adquisición de datos a través de las cuales se controla en convertidor. Estas tarjetas serán las que se implementen posteriormente en el vehículo y se detalla su funcionamiento en el capítulo 4.

Como alimentación a la entrada de potencia del convertidor se utiliza la pila de combustible, previamente caracterizada, y a la salida del convertidor se conecta la misma carga electrónica utilizada para la caracterización de la PEMFC. De esta manera no solo se consigue caracterizar el convertidor sino el sistema completo (Pila-Convertidor-Carga) que será posteriormente implementado en el vehículo.

En la imagen se puede apreciar una vista de la interfaz del programa creado para el control de las tarjetas de adquisición de datos para el control del convertidor. Este programa es el encargado también de guardar los datos para su posterior análisis.

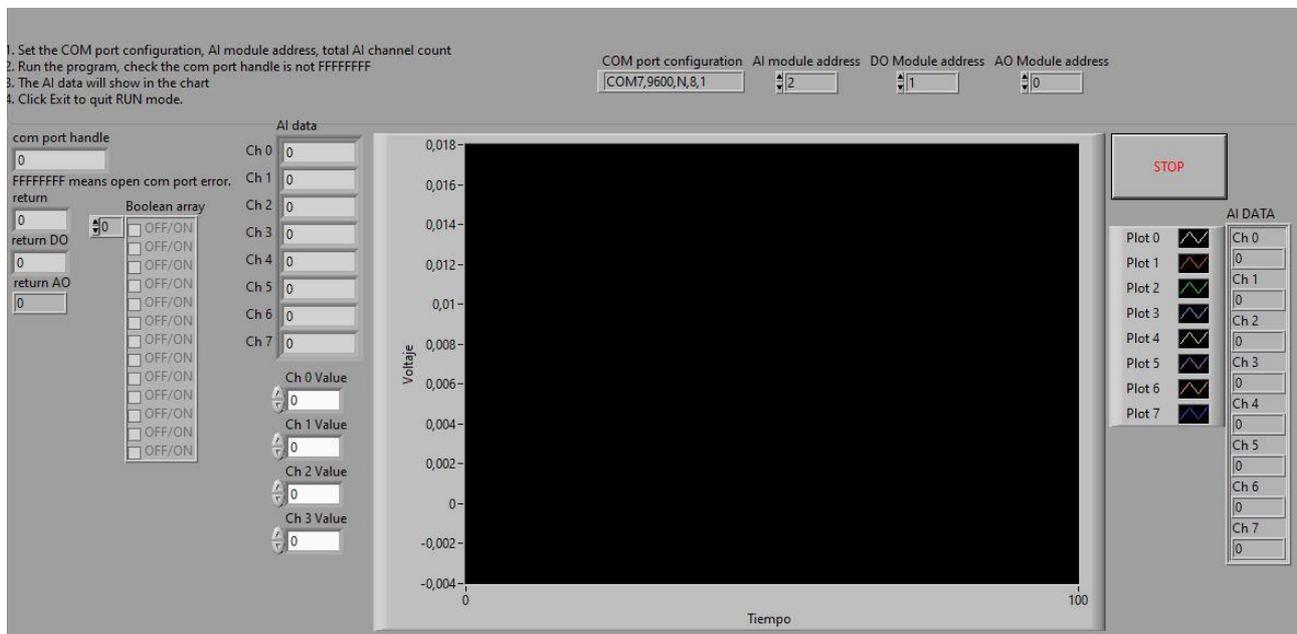


Figura 16 – Interfaz para control de TADs en el laboratorio

El montaje en el laboratorio se puede apreciar en las siguientes imágenes.



Figura 17 – Elementos para caracterización del BEV4



Figura 18 – Detalle conexionado de TADs en laboratorio

3.2.3 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de las distintas regulaciones.

3.2.3.1 Regulación en U_{out} con carga constante

Se ajustan los Setpoints con los siguientes valores:

$$U_{in}SP = 20V, U_{out}SP = 40V, I_{in}SP = 80A \text{ y } I_{out}SP = 60A.$$

Para esta prueba se mantendrán los valores constantes excepto $U_{out}SP$ que irá variando mientras se mantiene constante la intensidad demandada por carga electrónica ($I_{out} = 3A$).

Se aprecia que en cuanto se activa la entrada ON/OFF, el voltaje de salida alcanza el valor objetivo marcado por $U_{out}SP$ y a medida que se varía el valor del setpoint, los valores de intensidad y voltaje de entrada varían proporcionalmente, de manera que se cumple en todo momento la Ley de Ohm.

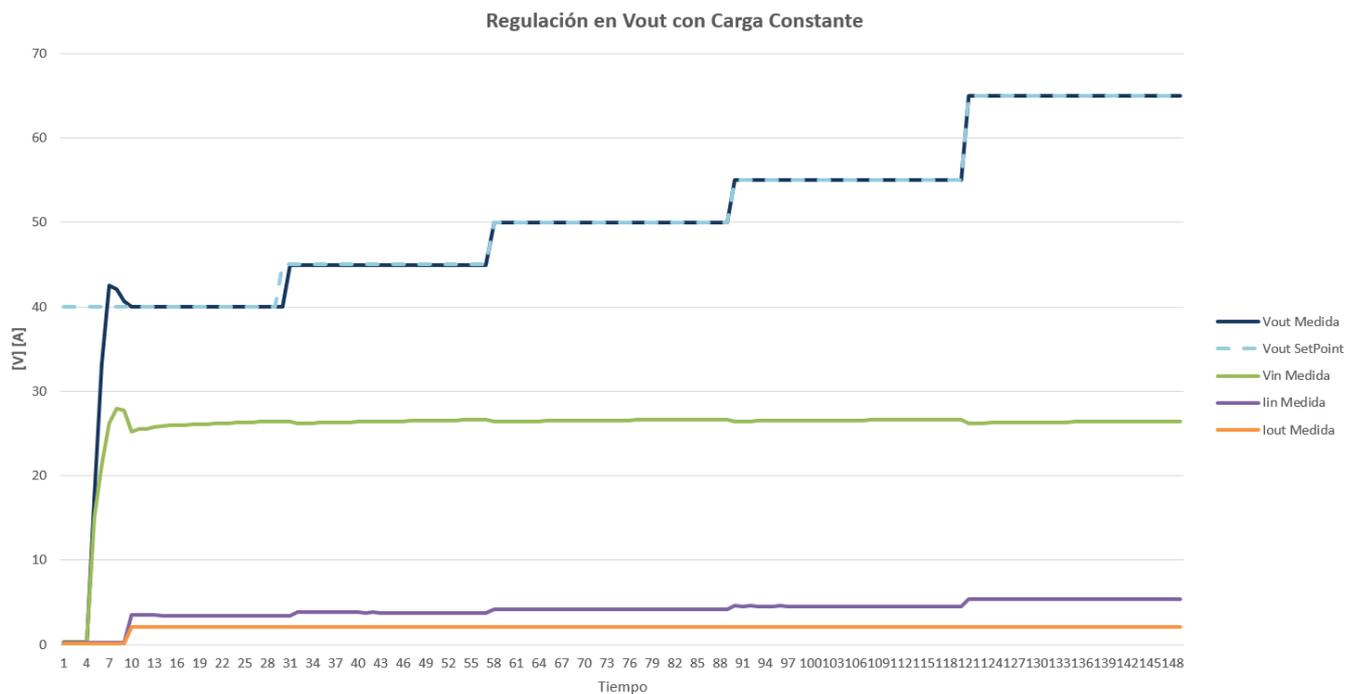


Figura 19 – Prueba de regulación en V_{out} con I_{out} constante

3.2.3.2 Regulación en Uout con carga variable

Se ajustan los Setpoints con los siguientes valores:

$$U_{in}SP = 20V, U_{out}SP = 45V, I_{in}SP = 80A \text{ y } I_{out}SP = 60A.$$

Para esta prueba se mantendrán los valores constantes excepto $U_{out}SP$ y la intensidad demandada por carga electrónica que irán variando.

Se aprecia que en cuanto se activa la entrada ON/OFF, el voltaje de salida alcanza el valor objetivo marcado por $U_{out}SP$ y el convertidor es capaz de seguir regulando conforme al setpoint dado para U_{out} a pesar de ir modificando la intensidad solicitada por la carga electrónica (I_{out}).

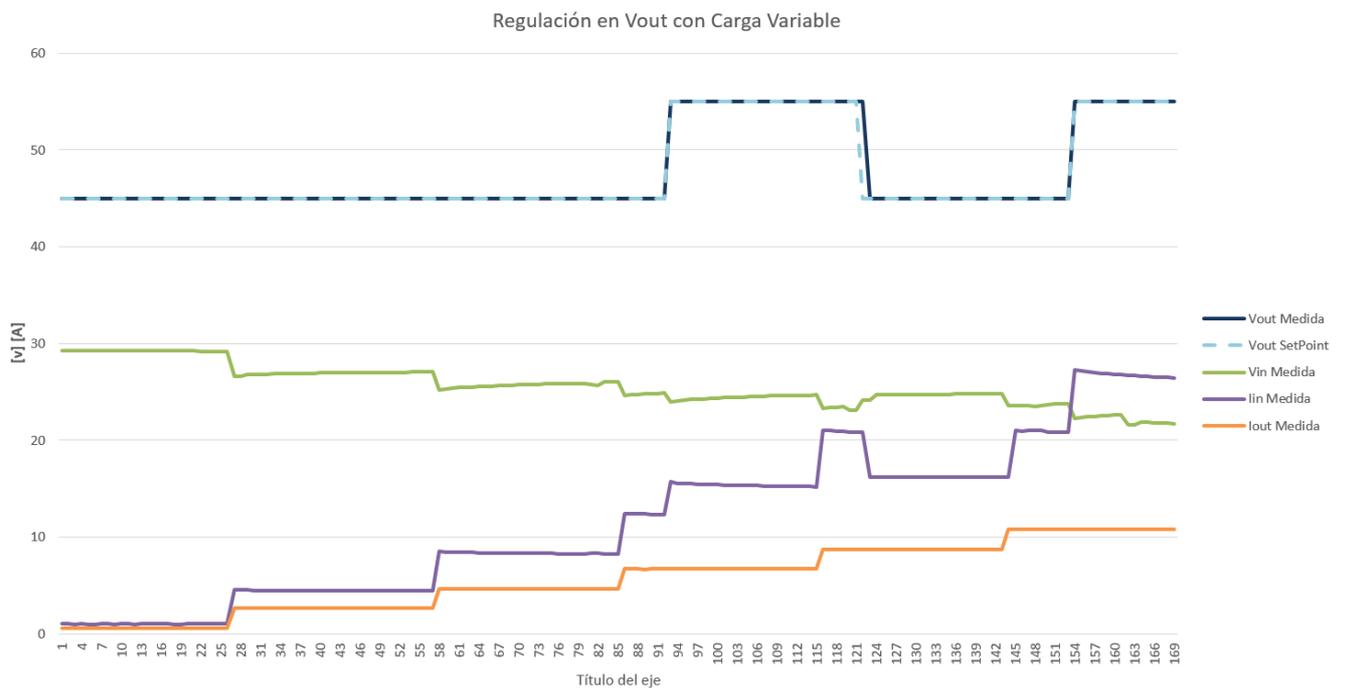


Figura 20 - Prueba de regulación en Vout con Iout variable

3.2.3.3 Regulación en lin con carga constante

Se ajustan los Setpoints con los siguientes valores:

$$U_{inSP} = 20V, U_{outSP} = 60V, I_{inSP} = 15A \text{ y } I_{outSP} = 60A.$$

Para esta prueba se mantendrán los valores constantes excepto I_{inSP} que irá variando mientras se mantiene constante la intensidad demandada por carga electrónica ($I_{out} = 5A$).

Podemos observar que mientras que I_{inSP} es mayor que la intensidad de entrada medida, el convertidor está regulando en tensión de salida. Una vez que I_{inSP} es menor que la intensidad demandada a la entrada, el convertidor comienza a regular según este parámetro y la tensión de salida varía proporcionalmente según la ley de Ohm.

Se aprecia que en el momento en que se fuerza que la $I_{in} < I_{out}$, el convertidor entra en bypass y cuando se vuelve a permitir que $I_{in} > I_{out}$ éste se recupera y sigue regulando.

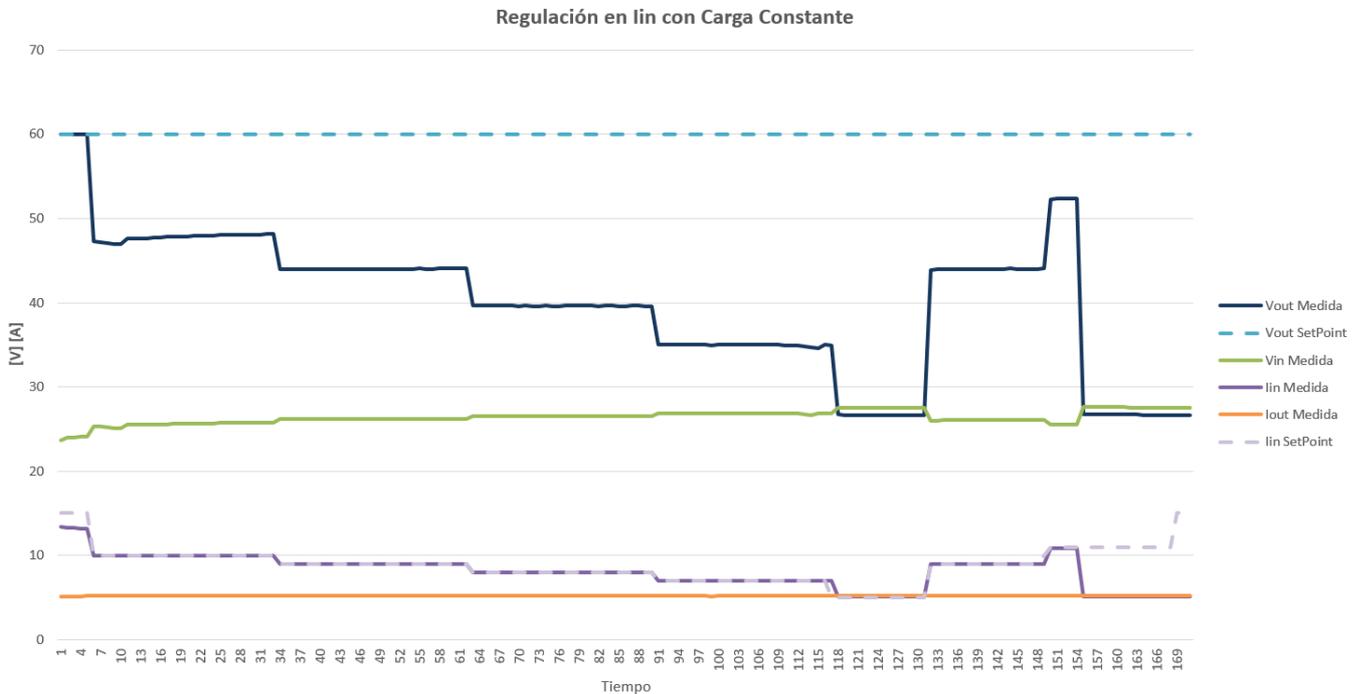


Figura 21 - Prueba de regulación en I_{in} con I_{out} constante

3.2.3.4 Regulación en lin con carga variable

Se ajustan los Setpoints con los siguientes valores:

$$U_{in}SP = 20V, U_{out}SP = 60V, I_{in}SP = 7A \text{ y } I_{out}SP = 60A.$$

Para esta prueba se mantendrán los valores constantes excepto $I_{in}SP$ y la intensidad demandada por la carga, que irán variando.

Podemos observar que mientras que $I_{in}SP$ es mayor que la intensidad de entrada medida, el convertidor está regulando en tensión de salida. Al empezar a aumentar la demanda de intensidad (I_{out}), la intensidad de entrada también aumenta. En el momento en que supera $I_{in}SP$, el convertidor comienza a regular en intensidad de entrada.

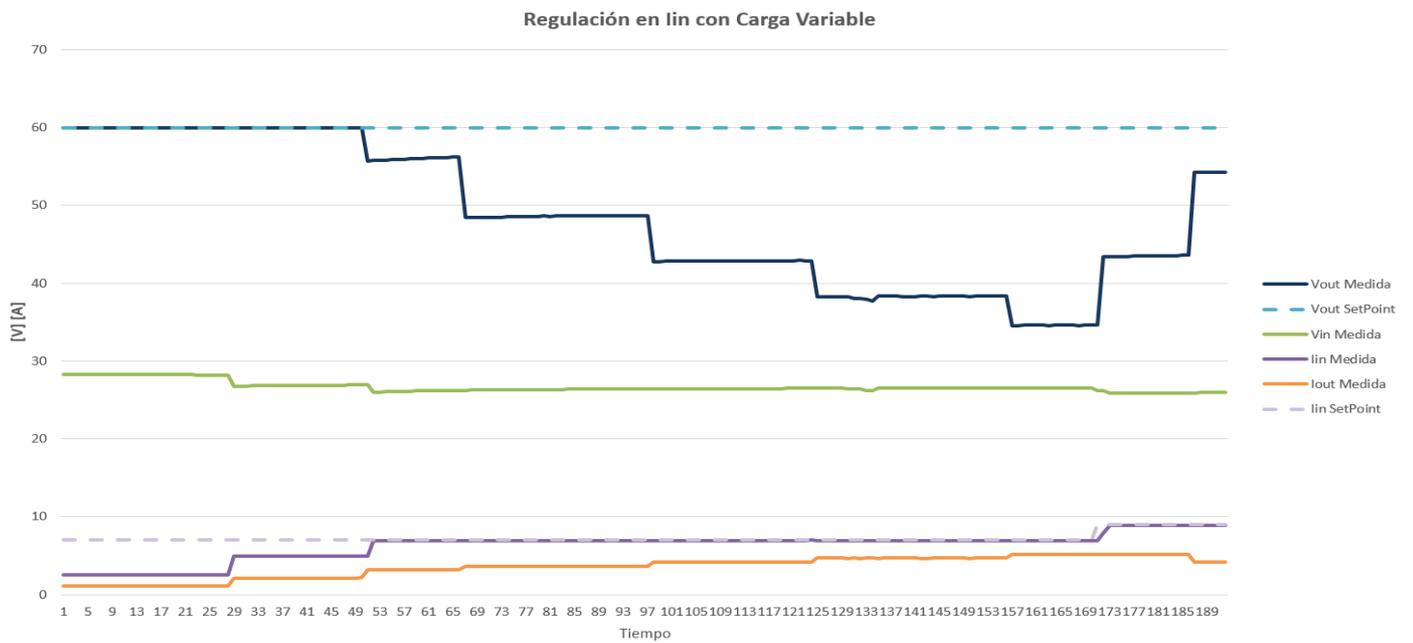


Figura 22 - Prueba de regulación en lin con Iout variable

3.2.3.5 Regulación en U_{out} e I_{in} con carga constante

Se ajustan los Setpoints con los siguientes valores:

$$U_{in}SP = 20V, U_{out}SP = 45V, I_{in}SP = 20A \text{ y } I_{out}SP = 60A.$$

En esta prueba se mantendrán los valores de $U_{in}SP$, $I_{out}SP$ y la intensidad demandada por carga constantes y se irá variando $U_{out}SP$ e $I_{in}SP$ de manera que se aprecie cómo el convertidor se ajusta y regula en torno al setpoint que se alcance primero.

La prueba comienza con el convertidor regulando en tensión de salida, puesto que la corriente de entrada solicitada es menor que el setpoint establecida para la misma. Manteniendo la intensidad de salida (I_{out}) constante, se comienza a elevar el setpoint de la tensión a la entrada y se observa como la tensión medida sigue la referencia hasta que el valor establecido hace que la intensidad a la entrada del convertidor sea mayor que la fijada por $I_{in}SP$, lo que provoca que el convertidor comience a regular en corriente de entrada y no en tensión a la salida.

Se mantiene regulando en corriente hasta que la se establece $U_{out}SP < U_{out}$, lo que vuelve a provocar que el convertidor deje de regular en corriente y lo haga en tensión.

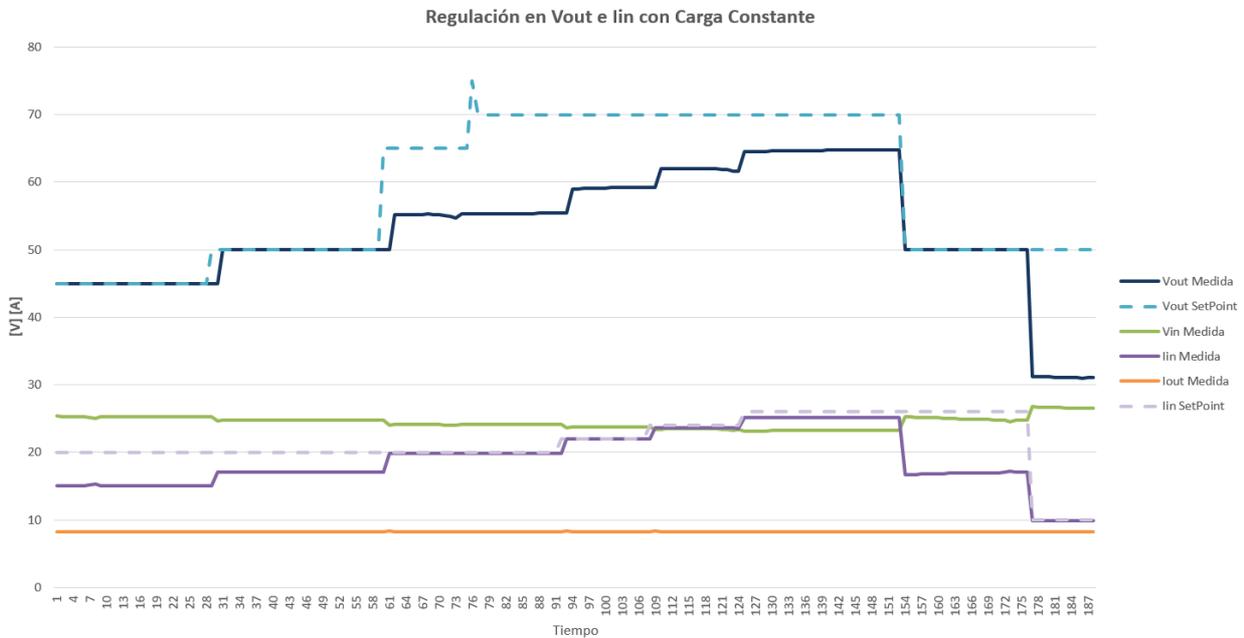


Figura 23 - Prueba de regulación en V_{out} e I_{in} con I_{out} constante

3.2.3.6 Regulación en Uout e Iin con carga variable

Se ajustan los Setpoints con los siguientes valores:

$$U_{inSP} = 20V, U_{outSP} = 40V, I_{inSP} = 15A \text{ y } I_{outSP} = 60A.$$

En esta prueba se mantendrán los valores de U_{inSP} e I_{outSP} mientras que la intensidad demandada por carga, U_{outSP} e I_{inSP} variarán de manera que se aprecie cómo el convertidor se ajusta y regula en torno al setpoint que se alcance primero.

La prueba comienza con el convertidor regulando en Uout, puesto que Iin es menor que el setpoint establecido. Al ir aumentando Iout, comienza a demandarse más corriente a la entrada, hasta que se alcanza la referencia fijada y el convertidor deja de regular en tensión para hacerlo en intensidad.

Se mantiene regulando en corriente hasta que se disminuye Iout lo suficiente como para que la corriente a la entrada esté por debajo del setpoint, por lo que se observa como vuelve a regular en tensión de salida.

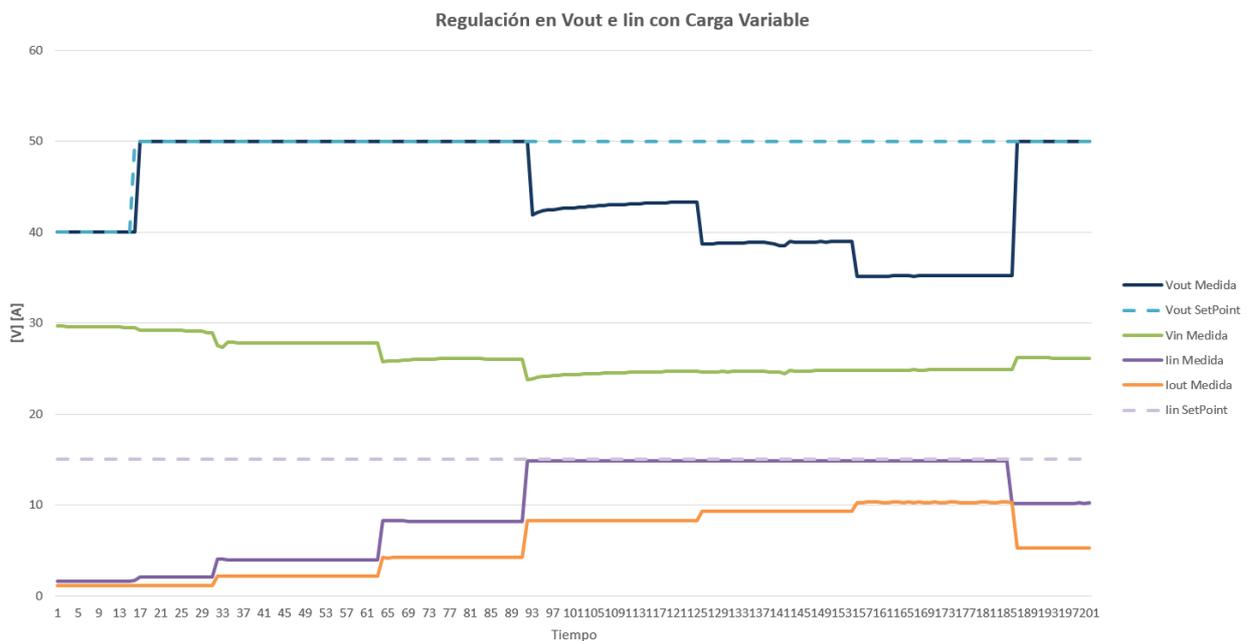


Figura 24 - Prueba de regulación en Vout e Iin con Iout variable

3.2.3.7 Regulación en Iout

Tras varios intentos se concluye que el convertidor no es capaz de regular en corriente de salida. En cuanto el setpoint es menor que la corriente que sale del convertidor, éste pasa a funcionar en modo bypass.

3.2.4 Conclusiones

El BEV4 ha demostrado que casi en cualquier circunstancia es capaz de regular según los valores de referencia que se establecen, excepto para el caso de regulación en corriente de salida. Esto puede ser debido a las condiciones de operación del convertidor, puesto que trabaja bajo condiciones de mucha vibración (carretera y amortiguación del vehículo en mal estado) y en condiciones de temperatura y humedad no apropiadas para la electrónica.

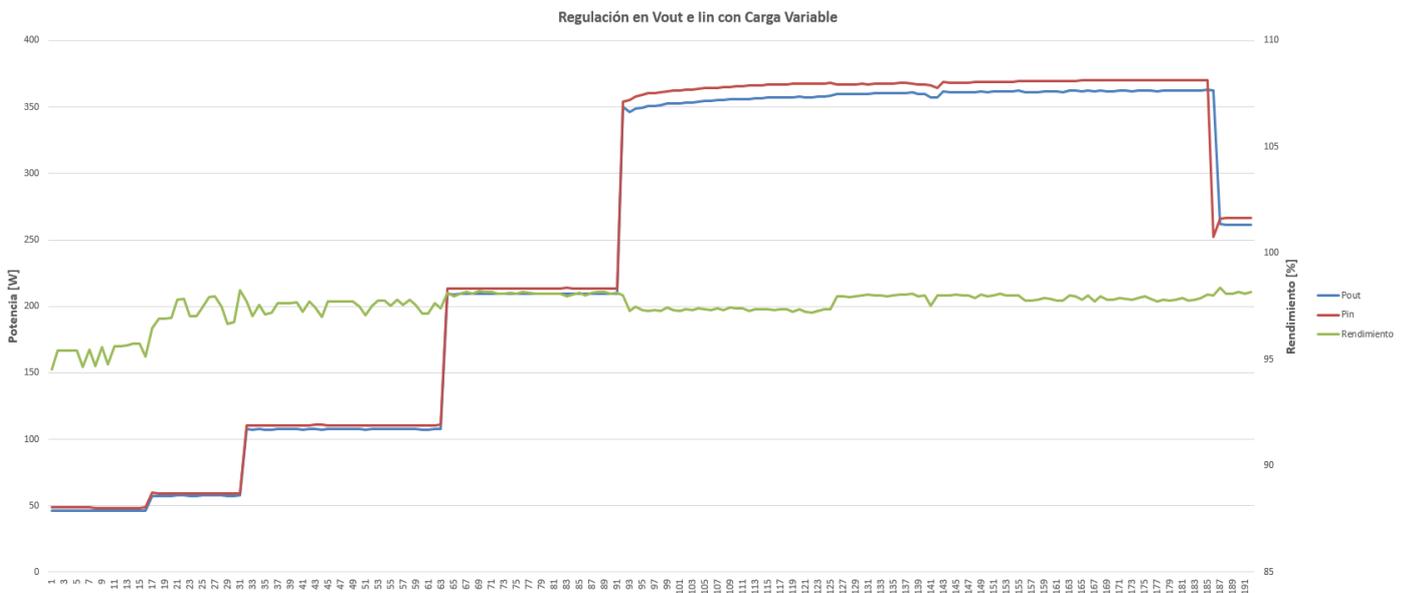
A pesar de este inconveniente, se prosigue con el convertidor, ya que, con la regulación simultánea de U_{out} e I_{in} es posible tener bajo control el sistema una vez sea integrado en el vehículo.

Además, aparte de haber demostrado experimentalmente que los datos aportados por el fabricante son ciertos, se calcula el rendimiento del convertidor mediante:

$$P_{out} = \eta \cdot P_{in} \quad \text{donde} \quad \begin{cases} P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \\ P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} \end{cases}$$

$$\eta_{CONV} \approx 94.6\%$$

Este rendimiento es el calculado tras hacer la media de varios rendimientos en las distintas pruebas explicadas en este capítulo. A modo de ejemplo se puede ver en la siguiente imagen los potencias de entra y salida y el rendimiento que se obtiene en el ejemplo de la regulación simultánea en U_{out} e I_{in} con carga variable.



4 CONFIGURACIÓN DE LA ELECTRÓNICA EMBARCADA

En este capítulo se explica el proceso que se ha llevado a cabo para configurar la electrónica embarcada en el vehículo. Esta electrónica es la encargada de hacer posible el control y la supervisión del sistema de potencia híbrido a base de hidrógeno que se ha implementado con éxito.

Concretamente se detalla cómo se ha realizado la configuración del ordenador de a bordo, así como la configuración y calibración del sistema de adquisición de datos y su comunicación con el ordenador.

4.1 Ordenador de a bordo

El ordenador de a bordo implementado en el vehículo es un PCM-3365 con un factor de forma PC/104-Plus (96 x 90 mm) de la marca Advantech. Lleva incorporado el procesador Atom™ E3845 con función de bajo consumo además de un buen rendimiento informático, especialmente para multimedia en comparación con las generaciones anteriores. El PCM-3365 ofrece posibilidades de expansión flexibles: un puerto mini PCIe de tamaño completo, PC/104, PCI-104 y varias capacidades de flash integrado.

Este ordenador embarcado admite varias interfaces de pantalla, incluidas HDMI/DVI, VGA y LVDS de 24 bits, y como puertos de E/S: 1 x GbE, SATA, 3x puertos serie, 6x USB 2.0 y mSATA.

Tiene un consumo a máxima potencia de 7.7 W y su rango de temperatura de operación es entre 0...60 °C.

4.1.1 Instalación del Sistema Operativo

El PCM-3365 es compatible con Win10, Win8, Win7, WES8, WES7, WEC7, Linux kernel 3.x, VxWorks 6.9.3.3, Android Kit Kat 4.4 .

Puesto que se pretende que el sistema funcione durante el mayor tiempo posible y ha habido algunos problemas con la obsolescencia de algunos programas, se opta por instalar el *Windows 10 Home N*, de manera que las aplicaciones, drivers, etc. sean los más nuevos posibles a fin de facilitar el mantenimiento y las posibles actualizaciones futuras.

4.1.2 Instalación Drivers

Una vez se ha instalado el sistema operativo especificado, el siguiente paso para que el ordenador pueda establecer comunicación con el resto de dispositivos electrónicos es mediante la instalación de los drivers necesarios. Éstos se muestran en la siguiente tabla.

Driver	Función
CP210x	Comunicación por USB
PCAN-USB-Hub-RS232	Comunicación por puerto serie para protocolo CAN
Peak-System	Comunicación para protocolo CAN
Driver para pantalla táctil	Visualización en pantalla mejorada
RunTime Labview	Ejecución de un ejecutable LabView

Tabla 3 - Drivers instalados en ordenador de a bordo

4.1.3 Ejecución automática

Tras configurar el ordenador de a bordo e instalar los drivers para que el sistema funcione sin problemas, el último paso es hacer que, al encenderse, se ejecute la aplicación encargada del control y supervisión del sistema de propulsión de hidrógeno.

Para ello, lo primero es generar un instalador del software de control y supervisión. Esto se hace para evitar tener que desarrollar el programa completo en el ordenador de a bordo, que normalmente tiene mucha menor capacidad y memoria que un ordenador convencional. De esta manera, se crea el archivo ejecutable en el ordenador utilizado para el desarrollo siguiendo estos pasos:

1. Teniendo el programa en un proyecto, se abre el explorador de proyectos y se selecciona el programa.
2. En la ventana *Tools* se selecciona la opción *Build application from VI*
3. Se especifica el nombre del ejecutable que se va a generar y se seleccionan los archivos fuente necesarios para el funcionamiento.
4. Una vez creado el ejecutable, hay que crear el instalador. Se hace click derecho en *Build Specifications* → *New* → *Installer*.
5. Se especifica el nombre del instalador y se selecciona el código fuente, en este caso, el ejecutable (.exe) creado previamente. Se hace click en *Build* y ya se tiene el instalador listo para el ordenador de a bordo.

Una vez se tiene el PCM-3365 en funcionamiento y se ha creado el instalador del programa de control y supervisión, solo queda crear una tarea programada que ejecute el .exe instalado previamente.

4.2 Tarjetas de adquisición de datos

Otro componente de la electrónica embarcada que se ha integrado desde cero han sido las tarjetas de adquisición de datos. Éstas son necesarias para controlar y recibir la información tanto del convertidor como de los distintos sensores que componen la instrumentación electrónica del vehículo.

Las tarjetas utilizadas son de la familia I-7000 de la marca ICP DAS y tanto las entradas como las salidas analógicas se utilizan en tensión diferencial.

Se pueden controlar de forma remota mediante un conjunto de comandos, a los que el fabricante llama protocolo DCON. Además, la comunicación entre las tarjetas y el host se realiza en formato ASCII a través de un estándar de bus serie bidireccional RS-485.

Tarjeta	Función
I-7520	Conversión RS-485 / RS-232
I-7017	Entradas analógicas (0...10V)
I-7024	Salidas analógicas (0...10V)

Tabla 4 - Tarjetas de adquisición de datos

4.2.1 Ajuste y calibración

La configuración de las tarjetas de adquisición de datos se ha llevado a cabo tras revisar la documentación aportada por al fabricante, donde se describe el proceso a seguir para poder utilizarlas.

En primer lugar, es necesario establecer los canales de comunicación entre las tarjetas y con el ordenador. Como se ha comentado antes, la comunicación entre las tarjetas se efectúa mediante el protocolo de comunicación serie RS-485 uniendo en un único bus de comunicaciones todos los puertos *DATA+* y *DATA-* entre sí.

Para la comunicación con el ordenador, puesto que éste no admite comunicación mediante RS-485, se hace uso de la tarjeta I-7520 para convertir la información al protocolo serie RS-232 y una vez convertido, se utiliza un convertor de RS-232 a USB. De esta forma, es posible acceder a la configuración interna de las tarjetas y a la información que proporcionan de manera simple mediante USB.

Se muestra el cableado y el convertor a USB implementado en las siguientes imágenes.



Figura 26 – Detalle cableado TADs durante su configuración

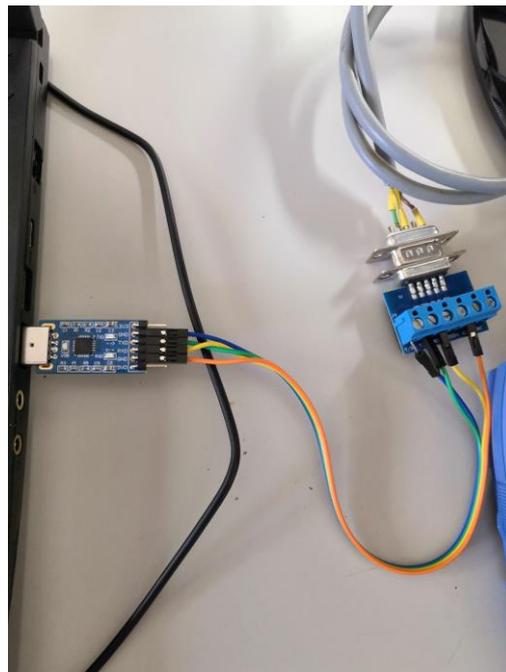


Figura 27 - Detalle conversión a USB de Comunicación Serie de TADs

En segundo lugar, una vez el sistema está cableado, se procede a realizar la configuración interna de las tarjetas. Esta configuración se hace mediante el software *DCON Utility Pro V4.0.0.3* que facilita la comunicación con las tarjetas y permite utilizar el protocolo de comunicación propio del fabricante *DCON Protocol*².

Al abrir el software, se hace una búsqueda de los puertos COM del ordenador para encontrar en cual están las tarjetas, como se aprecia en la imagen siguiente.

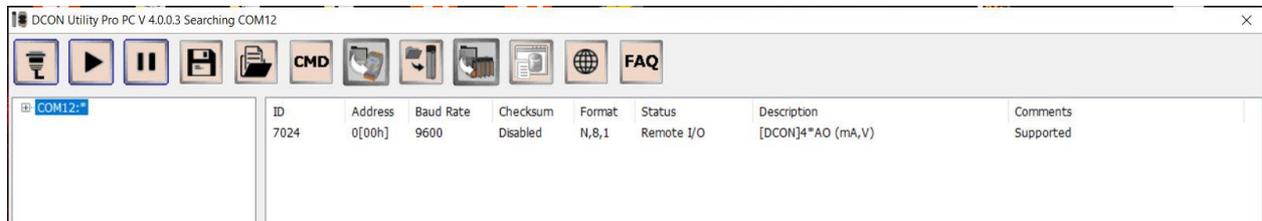


Figura 28 – Configuración TADs –Puerto COM–

Una vez se encuentra la tarjeta deseada, se procede a abrir la configuración para fijar la configuración deseada, como se observa en la imagen se opta por un establecer en 9600 baudios, sin bit de paridad y 8 bits por paquete. También se establecen las entradas y las salidas para el rango de 0...10V y la representación de la información en formato de ingeniería. Este procedimiento se muestra en la imagen abajo para la tarjeta I-7024 – salidas –, aunque es idéntica para la I-7017 – entradas –.

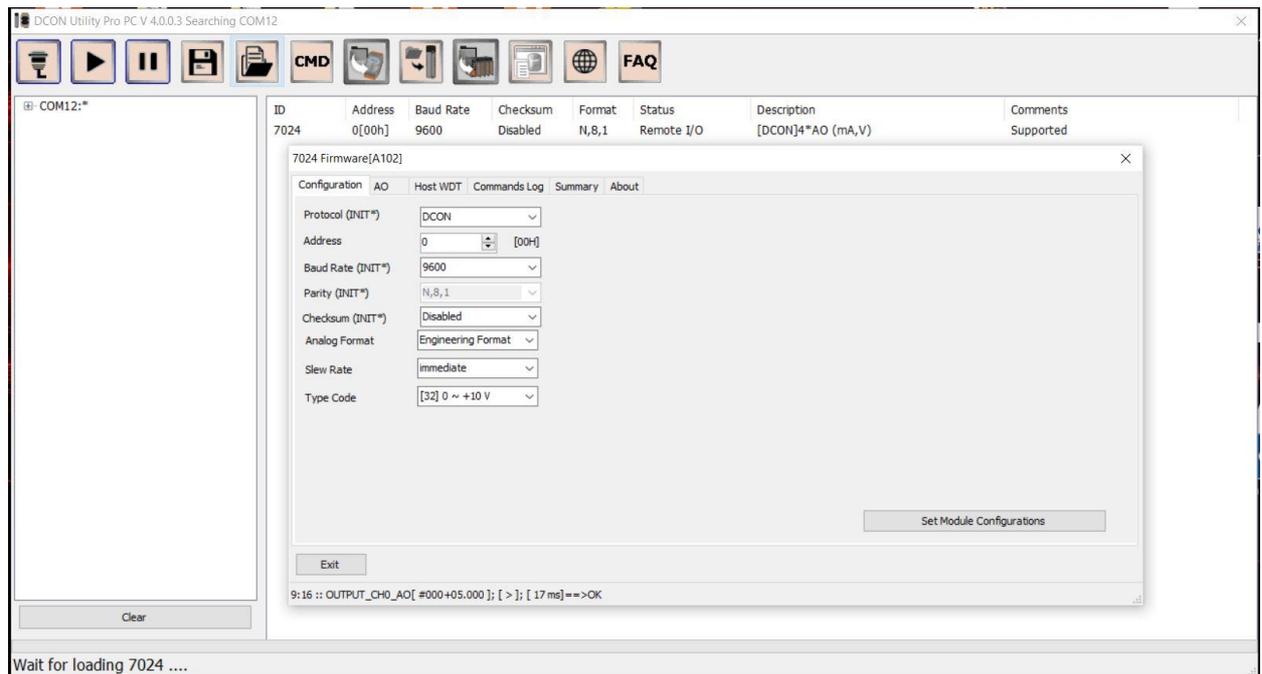


Figura 29 – Configuración TADs –Parámetros–

Para finalizar la configuración, se procede a comprobar que las tarjetas estén correctamente calibradas. Para ello, se mandan comandos mediante el software de configuración a las tarjetas de salida y con un polímetro se asegura que las salidas analógicas están bien. Posteriormente se calibra la tarjeta de entradas analógicas haciendo uso de la tarjeta de salidas analógicas previamente graduada.

² Los comandos utilizados para la configuración pueden encontrarse en los anexos de este documento

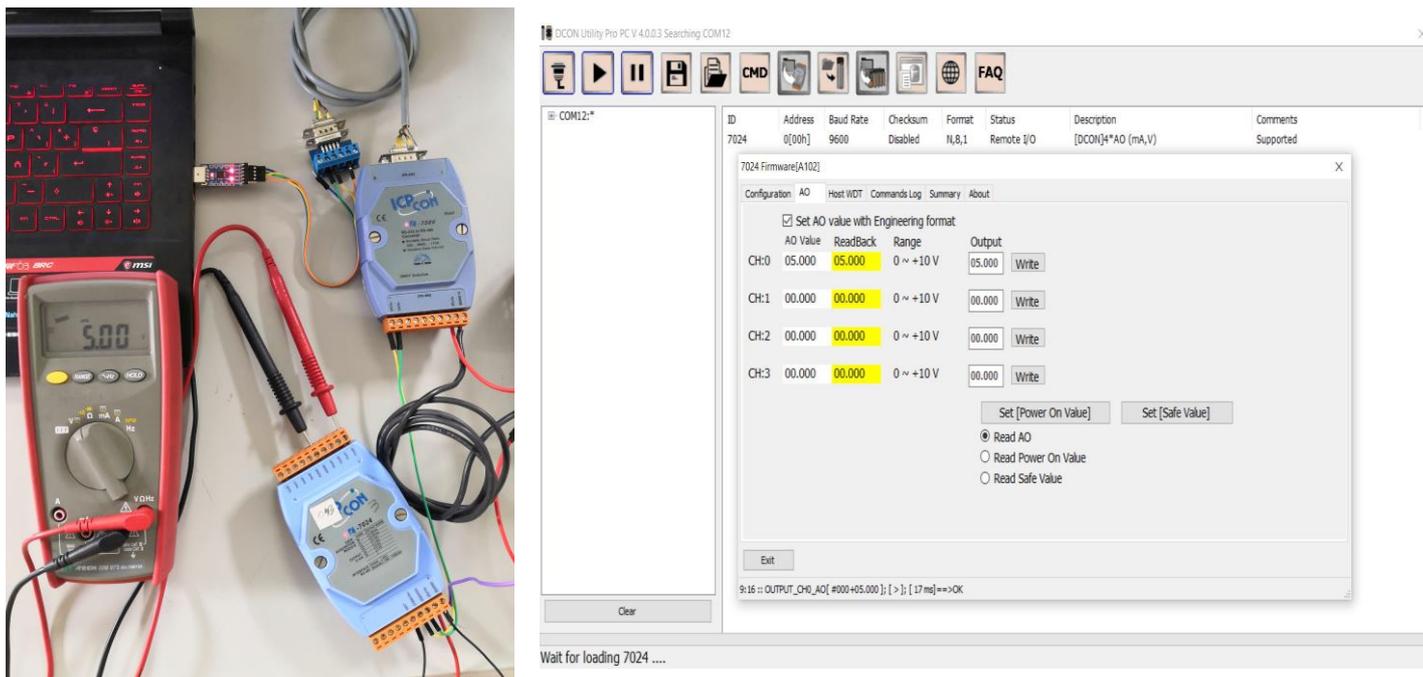


Figura 30 - Detalle calibración TADs

4.2.2 Información enviada y recibida

Teniendo las tarjetas configuradas y calibradas, el siguiente paso es comprobar el envío y recepción de la información a través del ordenador.

Los datos recibidos son los valores leídos por la tarjeta I-7017 y se expresan en el rango de 0...10V. Esta información debe ser tratada posteriormente vía software para comprender el valor real de lo que se mide. El tratamiento de estos datos se explica en el capítulo 5.

En cuanto a la información enviada a través de la tarjeta I-7024, se trata igualmente de valores entre 0...10V. Análogamente, esta información requiere de un tratamiento previo al envío que se hace mediante software y que se detalla en el siguiente capítulo.

5 SOFTWARE DE CONTROL Y SUPERVISIÓN

La potencia sin control no sirve de nada

- Young & Rubicam Agency para Pirelli, 1995 -

Control y supervisión son dos términos que, en el ámbito de la electrónica embarcada, suelen ir de la mano. Si bien este proyecto engloba distintos campos de la ingeniería, queda claro al lector que los objetivos que se proponen sólo se podrán alcanzar si los distintos elementos que componen el vehículo funcionan de manera coordinada y controlada

En este capítulo se explica el código desarrollado, desde la comunicación con los elementos hardware externos hasta el guardado de los datos recopilados durante la utilización del vehículo. Por supuesto, se detalla también el control implementado y la forma en que la información se muestra al usuario.

5.1 LabVIEW

El objetivo principal del vehículo es servir de prototipo para mostrar a los visitantes del INTA el funcionamiento de un vehículo con un sistema de propulsión basado en hidrógeno. Esto quiere decir que su función principal es la de mostrar al usuario la información de los distintos dispositivos integrados en el coche durante su funcionamiento. Es por ello que se decide realizar el desarrollo en LabVIEW, ya que ofrece una interfaz muy amigable para usuarios sin conocimientos en programación sin dejar de lado los requerimientos para el control y tratamiento de datos de la aplicación.

Esta decisión simplifica la configuración original que tenía el vehículo, pasando de dos ordenadores de a bordo con un lenguaje de programación distinto a sólo uno en el que todo se implementa en Labview.

5.1.1 Funcionamiento global

En este apartado se explica el funcionamiento general del código implementado puesto que es un código extenso y sería complicado obtener una visión clara de lo que se ha hecho.

En primer lugar, al iniciarse el programa, se inicializan todas las variables relacionadas con las entradas y salidas. De esta manera, se asegura que en la primera iteración del programa no existen valores aleatorios que puedan provocar fallos o errores en el funcionamiento. En esta etapa, se especifica también el modo de funcionamiento para el control del sistema de propulsión, que se establece en modo automático. Posteriormente se explicará este y los demás modos de funcionamiento en detalle.

Tras fijar estos valores, se procede con la inicialización de las comunicaciones. Puesto que se tienen dos

protocolos de comunicación distintos (Puerto serie y CAN Bus), se determina la configuración de cada uno de ellos.

- **CAN**
Baudios: 500k
Tipo de mensaje: standard
- **Puerto serie**
Puerto COM: COM4
Baudios: 9600
Bits por paquete: 8
Bit de paridad: No
Bits de paro: 1
Dirección de la TAD: 0 → Salidas analógicas

En este mismo punto y tras haber inicializado las comunicaciones, se envía el comando de puesta en marcha de la pila de combustible para que comience el arranque del sistema de propulsión.

Una vez se han fijado los valores de inicio de las variables y se tiene establecida comunicación con el resto de la instrumentación del vehículo, comienza la ejecución de los bucles de control y supervisión. Llegados a este punto, cabe mencionar que se ejecutan seis bucles en paralelo cuyo funcionamiento permite la coordinación de las partes implicadas.

5.1.1.1 Bucle de comprobación de pantallas

Este bucle es el encargado de comprobar si el usuario ha pulsado alguno de los botones para la navegación entre las distintas pantallas que se han desarrollado como interfaz gráfica de la aplicación.

El bucle se ejecuta cada 250 milisegundos, que es un periodo relativamente largo para el ordenador de a bordo, pero que ayuda a no saturar la ejecución del código principal, manteniendo una tasa de refresco que no resulta molesta al usuario.

5.1.1.2 Bucle de comprobación de errores

En este lazo se monitoriza continuamente el estado de las comunicaciones CAN y serie para detectar de inmediato cualquier posible disfunción que pueda comprometer el sistema de propulsión. En caso de error, se activan señales luminosas en la pantalla y se muestra el mensaje de error encontrado.

5.1.1.3 Bucle de guardado de datos

La tarea de este bucle puede resumirse en que es el responsable de hacer que, tanto la información recibida de la PEMFC, del convertidor y de los sensores, como los comandos de control enviados sean guardados de manera correcta para su posterior análisis. El guardado de datos se ejecuta una vez por segundo.

El funcionamiento detallado de este bucle se explica más adelante.

5.1.1.4 Bucle de niveles de potencia

La función de este bucle es ajustar el nivel de potencia que se solicitará a la pila cuando el sistema de hidrógeno esté funcionando en modo automático. Si bien este lazo de control está continuamente ejecutándose, sólo tendrá relevancia si se dan unas condiciones específicas al mismo tiempo, que son:

- El modo automático está activado
- No hay bypass en el convertidor
- La pila de combustible está funcionando correctamente
- Las baterías están en el rango establecido de carga

Estas condiciones se fijan para que los puntos de funcionamiento de la pila se soliciten en condiciones de seguridad para todo el sistema de propulsión y ningún elemento sea dañado.

Tanto la potencia solicitada como el tiempo que la FC estará funcionando en cada nivel se establece teniendo en cuenta la curva de polarización y la dinámica de la pila de combustible. Así, se decide implementar tres puntos de funcionamiento como se muestra en la siguiente tabla.

Nivel de potencia	Potencia solicitada	Tiempo de funcionamiento
Bajo	200 Watios	30 segundos
Medio	400 Watios	60 segundos
Óptimo	700 Watios	Hasta apagado o cambio a Modo Test

Tabla 5 - Niveles de potencia en Modo Automático

Se decide que este lazo de control sea independiente fuera del bucle principal para evitar posibles errores de funcionamiento en cuanto a la temporización.

5.1.1.5 Bucle de apagado controlado

Este bucle juega un papel muy relevante para la electrónica de todo el sistema basado en hidrógeno puesto que, el hecho de llevar a cabo un cierre controlado del software que maneja el sistema de propulsión hace que la vida útil de todos los componentes involucrados se alargue al evitar cierres o apagados en condiciones en las que no se debería.

El funcionamiento de este bloque es monitorizar en todo momento si el usuario pulsa alguno de los botones diseñados para detener el sistema de generación de potencia mediante hidrógeno (botones *Stop* y *Datos* que se mostraran en apartados posteriores). En caso de pulsar *Stop*, se entiende que el usuario quiere dar por finalizado el uso del vehículo, por lo que el procedimiento es:

1. Apagado de la pila de combustible.
2. Cierre ordenado de los puertos de comunicación para evitar posibles errores de funcionamiento al ejecutar de nuevo el código.
3. Confirmación del guardado de los datos durante el tiempo de funcionamiento.
4. Apagado del ordenador de a bordo.

En caso de pulsar *Datos*, se entiende que el usuario quiere dar por finalizado el uso del vehículo, pero no quiere apagar por completo el sistema, normalmente para acceder a los datos almacenados. En este caso el procedimiento es análogo al de apagado completo, pero en vez de apagar el ordenador, lo que hace es cerrar la aplicación de control y supervisión y lleva al usuario al escritorio del ordenador de a bordo, donde de manera automática puede acceder a los datos guardados o a la propia configuración del ordenador.

5.1.1.6 Bucle principal

Los bucles comentados anteriormente se ejecutan en paralelo, ya sea, porque necesitan una temporización específica o porque tienen un nivel de prioridad mayor.

En este bucle se llevan a cabo la mayoría de funciones del código de control y supervisión implementado. Estas tareas se desarrollan de manera ordenada, es decir, hasta que no ha terminado una, no comienza la siguiente. Así, el procedimiento es:

1. Recepción de los datos procedentes de la PEMFC, convertidor y sensores.
2. Activación del modo de funcionamiento seleccionado por el usuario, Test o Auto.
 - a. Modo Test: el usuario establece la potencia que la pila suministrará al Sistema y tiene el mando sobre los comandos de control de la PEMFC.
 - b. Modo Auto: el control desarrollado fija los escalones de potencia que la pila de combustible genera en función de la curva de polarización y de la dinámica de ésta. Este modo se ejecuta hasta que el usuario cambie manualmente al modo Test o en caso de que algún componente muestre un mal funcionamiento como, por ejemplo, que el convertidor entre en bypass.
3. Tras establecerse el modo de operación (Test o Auto), el siguiente paso es el tratamiento y visualización de los datos recibidos en primera instancia, así como de los comandos de control que se hayan determinado. En este punto se efectúan las conversiones pertinentes para que la información se muestre de manera clara al usuario en las distintas pantallas de la aplicación.
4. Una vez que toda la información se ha mostrado al usuario, se procede con la transmisión de los comandos de control. Estos pueden proceder del usuario, si el sistema funciona en modo Test o del algoritmo de control si lo hace en modo Auto.
5. Por último, se implementa la posibilidad de ejecutar un reset en alguna de las comunicaciones (CAN o Serie) bajo orden del usuario. Esta función se desarrolla para tener la posibilidad de arreglar rápidamente posibles errores menores que puedan darse en las transmisiones. Se ejecuta pulsando un botón de la interfaz, independientemente del modo de funcionamiento del sistema.

5.1.1.7 Diagrama de flujo global

A continuación, se muestra un diagrama de flujo que explica el funcionamiento del algoritmo implementado de manera general.

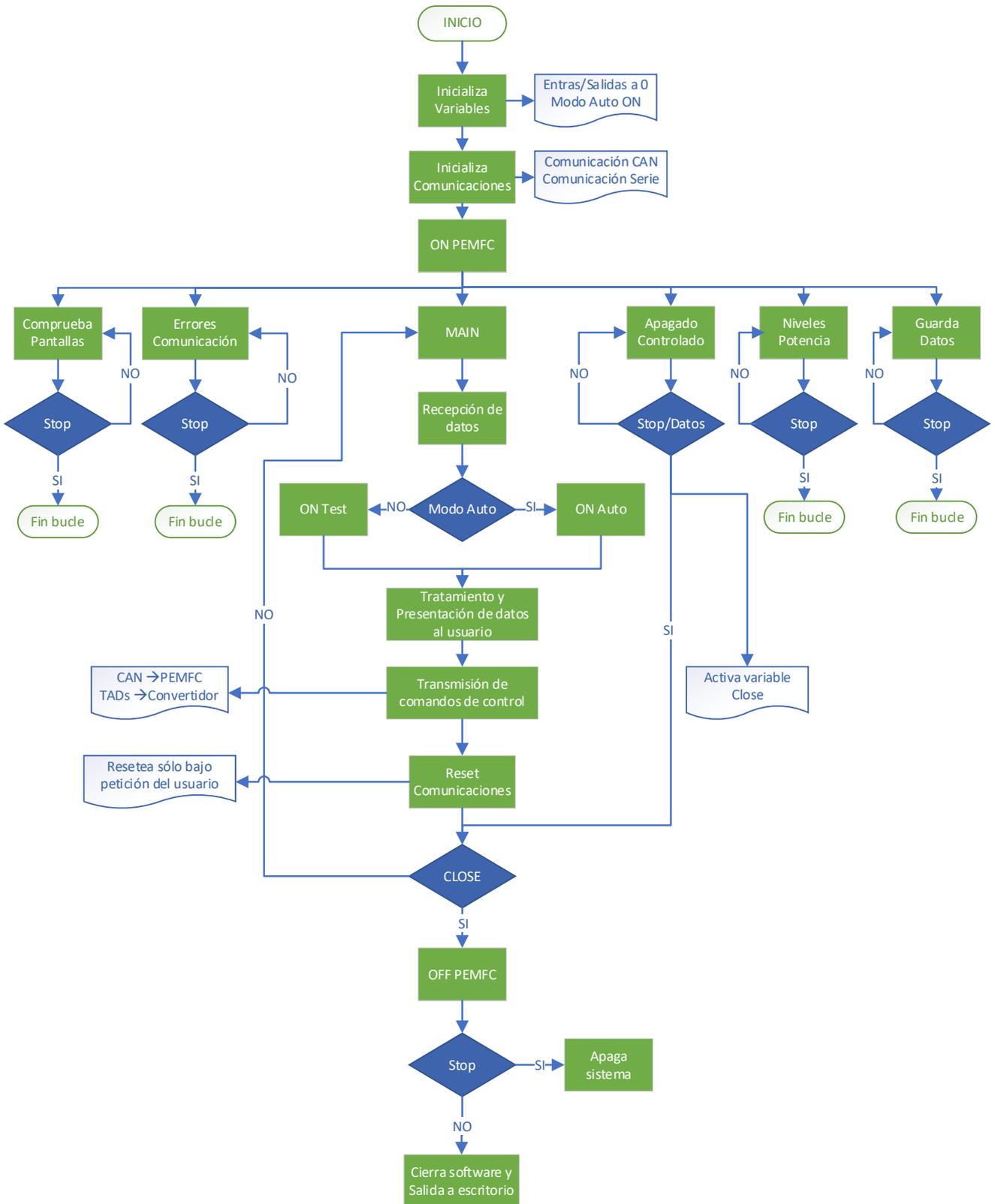


Figura 31 - Diagrama de flujo global

En los siguientes apartados se detalla cada una de las partes principales del código desarrollado.

5.1.2 Comunicación

En este apartado se explica el cómo el ordenador de a bordo se comunica a través de Labview con la instrumentación integrada en el vehículo. La comunicación se realiza a través de dos canales, por puerto serie (RS-232) y mediante CAN Bus, ambos a través de adaptadores a USB para facilitar la conexión con el ordenador embarcado.

Suponiendo que la conexión ya ha sido establecida, se detallan a continuación los protocolos de comunicación, así como la información transmitida por cada canal.

5.1.2.1 Puerto Serie

La comunicación mediante puerto serie es la utilizada para la transmisión de información de los sensores y el convertidor DC/DC instalados en el vehículo. Esta comunicación se realiza a través de las tarjetas de adquisición de datos, ya sean entradas o salidas analógicas, todas ellas en un rango máximo de entre 0...10V.

En la siguiente tabla se muestra la información que se recibe y envía a través del puerto serie.

Entradas [Rango]	Salidas [Rango]
U_{inAV} [0...10]	U_{inSP} [0...10]
U_{outAV} [0...10]	U_{outSP} [0...10]
I_{inAV} [0...10]	I_{inSP} [0...10]
I_{outAV} [0...10]	I_{outSP} [0...10]
Temp. depósito H2 [0...4,5]	
Presión depósito H2 [0...5]	
Presión entrada FC [0...5]	

Tabla 6 - Entradas/Salidas Puerto Serie

Los valores no tienen unidades puesto que se necesita un tratamiento posterior que los convierta a las magnitudes físicas que representan. Este paso se lleva a cabo en la etapa de supervisión.

Para cada lectura y envío de información, se comprueba si ha habido errores y, en ese caso, se muestra el mensaje de error detectado para que el usuario tome las acciones pertinentes.

Cabe mencionar, además, que se ha implementado una temporización distinta al resto de comunicaciones, dado que se detectó que la información transmitida mediante CAN no se actualizaba correctamente. Este fallo de funcionamiento generaba un retraso en la recepción vía CAN bus, por lo que se ha implementado un registro de desplazamiento que hace que la comunicación serie se ejecute cada 200 milisegundos en lugar de cada 5 como se hace para CAN. De esta manera se consigue que toda la información se transmita correctamente.

5.1.2.2 CAN Bus

La comunicación mediante CAN Bus es la utilizada para la transmisión de información de la pila de combustible. Para establecer esta comunicación, se hace uso de un conversor de CAN a USB. Esta conversión no implica que se modifique el protocolo, simplemente hace que la conexión física sea más sencilla para el ordenador embarcado.

La transmisión de datos se efectúa cada 5 milisegundos y se comprueba si ha habido errores y, en ese caso, se muestra el mensaje de error detectado.

El tratamiento de los datos se lleva a cabo haciendo uso de la documentación facilitada por el fabricante, donde se detalla la codificación de la información transmitida por la pila de combustible. Esta (des)codificación de la información se realiza en el momento de la recepción o envío respectivamente.

En la siguiente tabla se muestra la información que se recibe y envía mediante CAN Bus.

Entradas	Salidas
Tensión de salida de FC	Comando Start de FC
Corriente de salida de FC	Comando Reset de FC
Temperatura ambiente	Comando Stop de FC
Temperatura interna de FC	
Consumo interno de FC	
Presión de entrada de H_2	
Presión de operación de H_2	
Velocidad del ventilador	
Concentración de H_2	
Funcionamiento de válvulas	
Funcionamiento de relé de carga	
Estado de funcionamiento de FC	
Errores de FC	

Tabla 7 - Entradas/Salidas CANBus

5.1.2.3 Reset de comunicaciones

El hecho de tener dos protocolos de comunicación, cada uno con tempo diferente, puede llevar a pequeños retrasos o incluso errores durante la ejecución del software de control y supervisión. Por este motivo, se implementa en el desarrollo la posibilidad de resetear alguna de las comunicaciones a voluntad del usuario durante el uso normal del sistema de propulsión.

El proceso que se sigue es bastante sencillo, ya que, lo que se hace, es cerrar el puerto de que se está utilizando de manera ordenada y volver a configurarlo. Este reseteo de las comunicaciones suele solucionar la mayoría de errores de comunicación.

Además, aparte de producirse cuando el usuario lo solicita, se programa un reseteo periódico – cada 10 segundos – de la comunicación CAN, puesto que, tras varias pruebas de funcionamiento de larga duración (2...2,5 horas), se detectó que se producían retrasos leves en la recepción de la información.

5.1.3 Supervisión

En este apartado se explican las distintas pantallas de la aplicación que sirven al usuario de supervisión del estado del funcionamiento global del vehículo.

El acceso a estas pantallas se hace a través de la botonera que se mantiene fija en la parte superior sea cual sea la que se encuentre activa. La información que se muestra al usuario va desde señales luminosas (errores o avisos) hasta gráficas en función del tiempo, pasando por representación numérica estándar.

Además, en esta etapa de la ejecución del código, se lleva a cabo el tratamiento de la información transmitida mediante las tarjetas de adquisición de datos (datos de los sensores y del convertidor).

Información	Rango [V]	Conversión
U_{inAV}, U_{inSP}	0...10	0...80 V
U_{outAV}, U_{outSP}	0...10	0...100 V
I_{inAV}, I_{inSP}	0...10	0...100 A
I_{outAV}, I_{outSP}	0...10	0...65 A
Temp. depósito H2	0...4,5	-40...85 °C

Presión depósito H2	0,5...4,5	0...448 bar
Presión entrada FC	0...5	0...16 bar

Tabla 8 – Conversiones información de TADs

Con la información procesada, se implementa en esta etapa también las condiciones por las que se considera que el convertidor ha entrado en modo bypass. En caso de cumplirse alguna de las siguientes condiciones, se activa una alerta en la interfaz y se toman las medidas pertinentes en el algoritmo de control. Estas condiciones son:

- $U_{outAV} < U_{inSP}$
- $I_{outAV} < 0.5 \cdot I_{outSP}$
- Estas condiciones activarán la señal de bypass siempre y cuando la FC esté entregando potencia.

5.1.3.1 Pantalla Principal

En esta pantalla se muestra la información más relevante durante el funcionamiento del sistema de propulsión a base de hidrógeno.

Aparte de la botonera de navegación entre pantallas en la parte superior, la información que se es la siguiente:

Información	Posición en la pantalla
Modo de operación	1
Señales de errores generales	2
Potencia de PEMFC y hacia baterías	3
Voltajes de E/S el convertidor	4
Presión en el depósito de H_2	5
Guardado de datos	6
Botón <i>Stop</i> para fin de ejecución	7

Tabla 9 – Información en Pantalla Principal

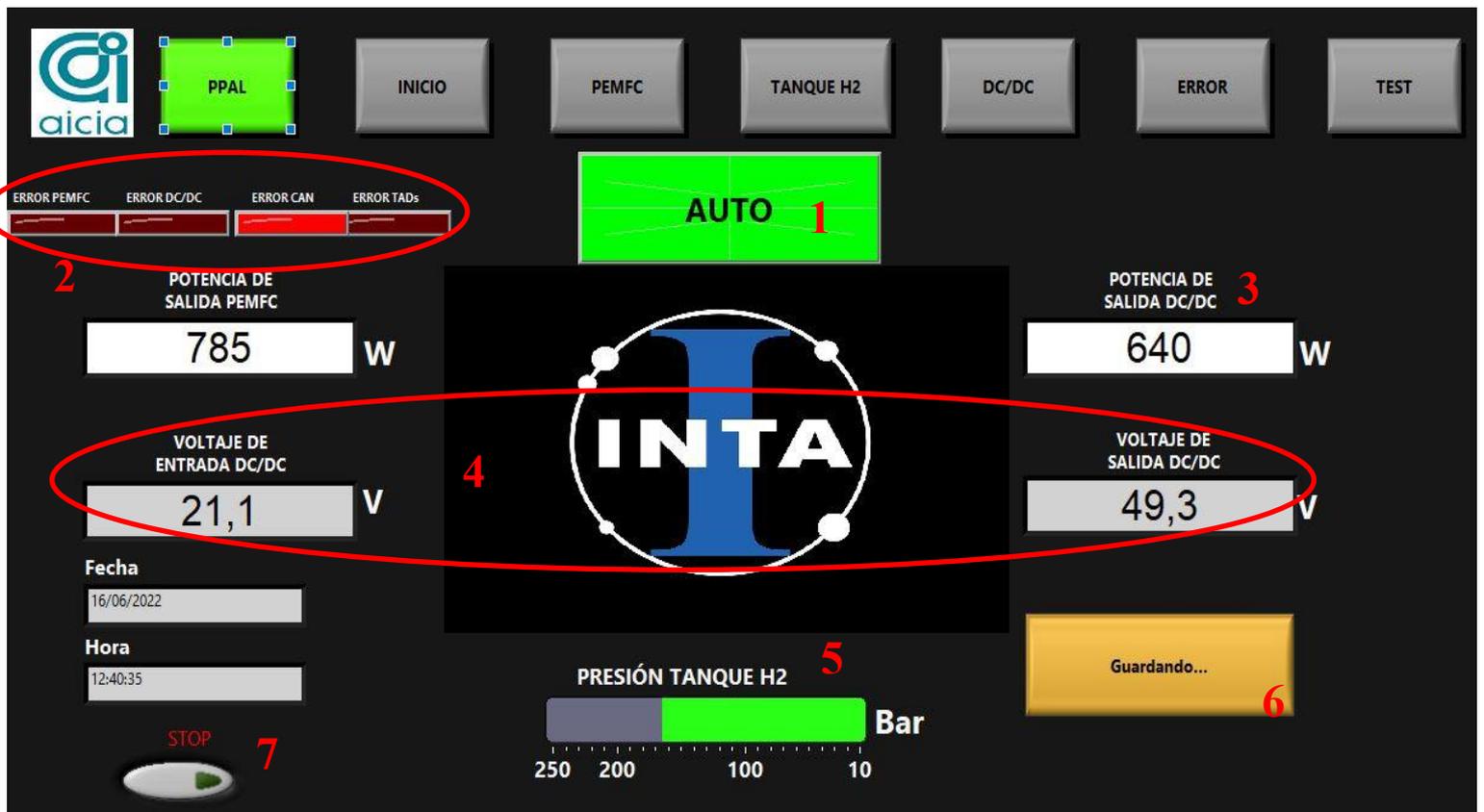


Figura 32 – Pantalla Principal

5.1.3.2 Pantalla Inicio

En esta pantalla se ofrecen al usuario los botones para cambiar entre modos de operación además del estado de funcionamiento de la pila, información sobre el estado el convertidor y datos sobre los flujos de energía. También se encuentra el botón para finalizar la ejecución del sistema de propulsión para acceder a los datos almacenados.

En la siguiente tabla se especifica junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Botones para modo de operación y estado del sistema	1
Estado de la PEMFC	2
Información sobre el convertidor	3
Flujo de energía (potencias, corriente y carga de baterías)	4
Botón <i>Datos</i> para fin parcial de ejecución	5

Tabla 10 - Información en Pantalla Inicio

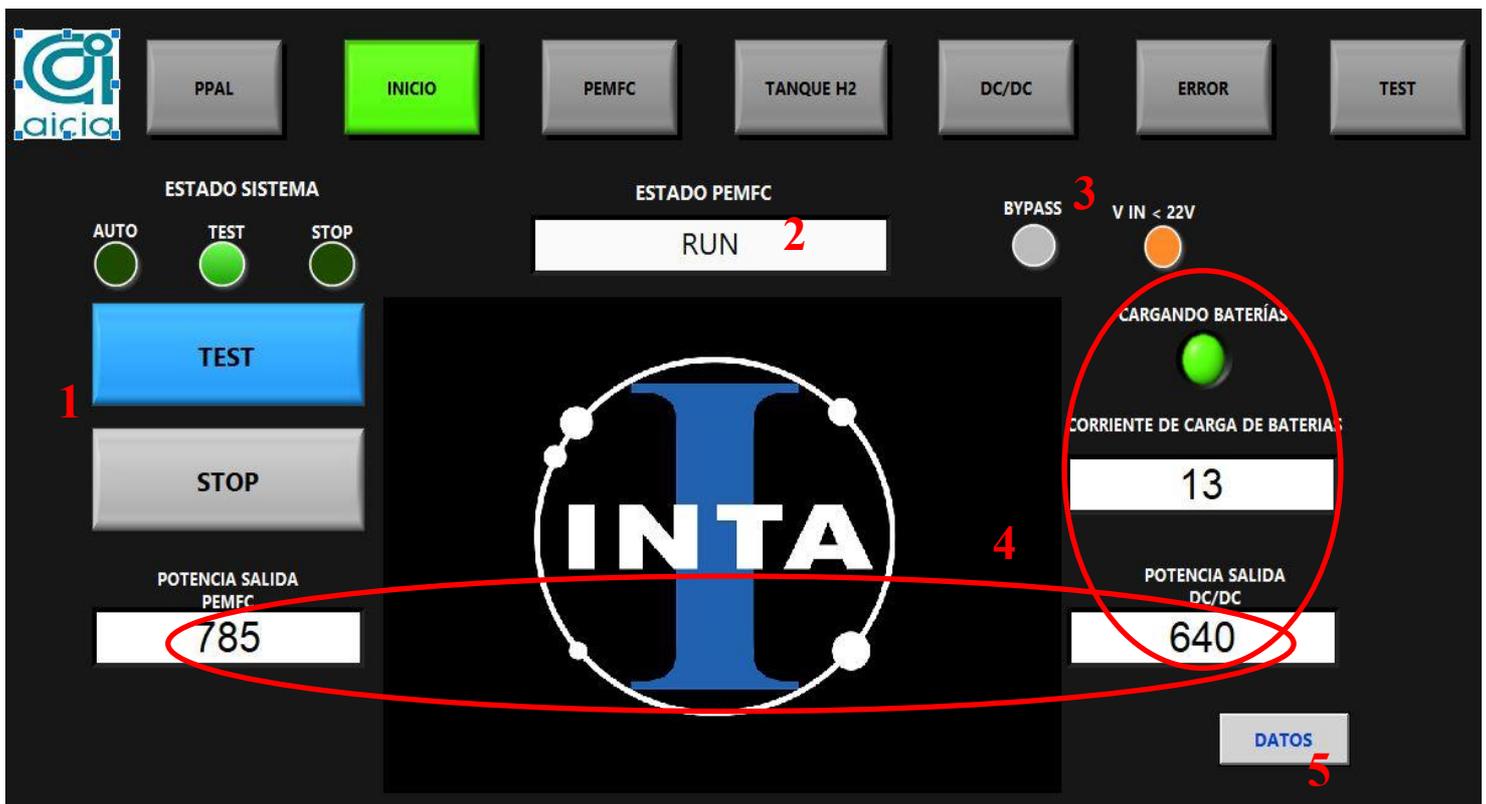


Figura 33 - Pantalla Inicio

5.1.3.3 Pantalla PEMFC

En esta pantalla se muestra al usuario toda la información relativa a la pila de combustible. En la siguiente tabla se especifica junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Potencia, tensión y corriente de salida	1
Presión de entrada	2
Presión de operación	3
Concentración de H_2	4
Operación de válvulas	5
Estado de PEMFC	6
Fuente de alimentación	7
Temperatura ambiente	8
Temperatura interna	9
Operación del relé de carga	10
Potencia, tensión y corriente propias del sistema	11
Velocidad del ventilador	12
Activación de purga	13

Tabla 11 - Información en Pantalla PEMFC

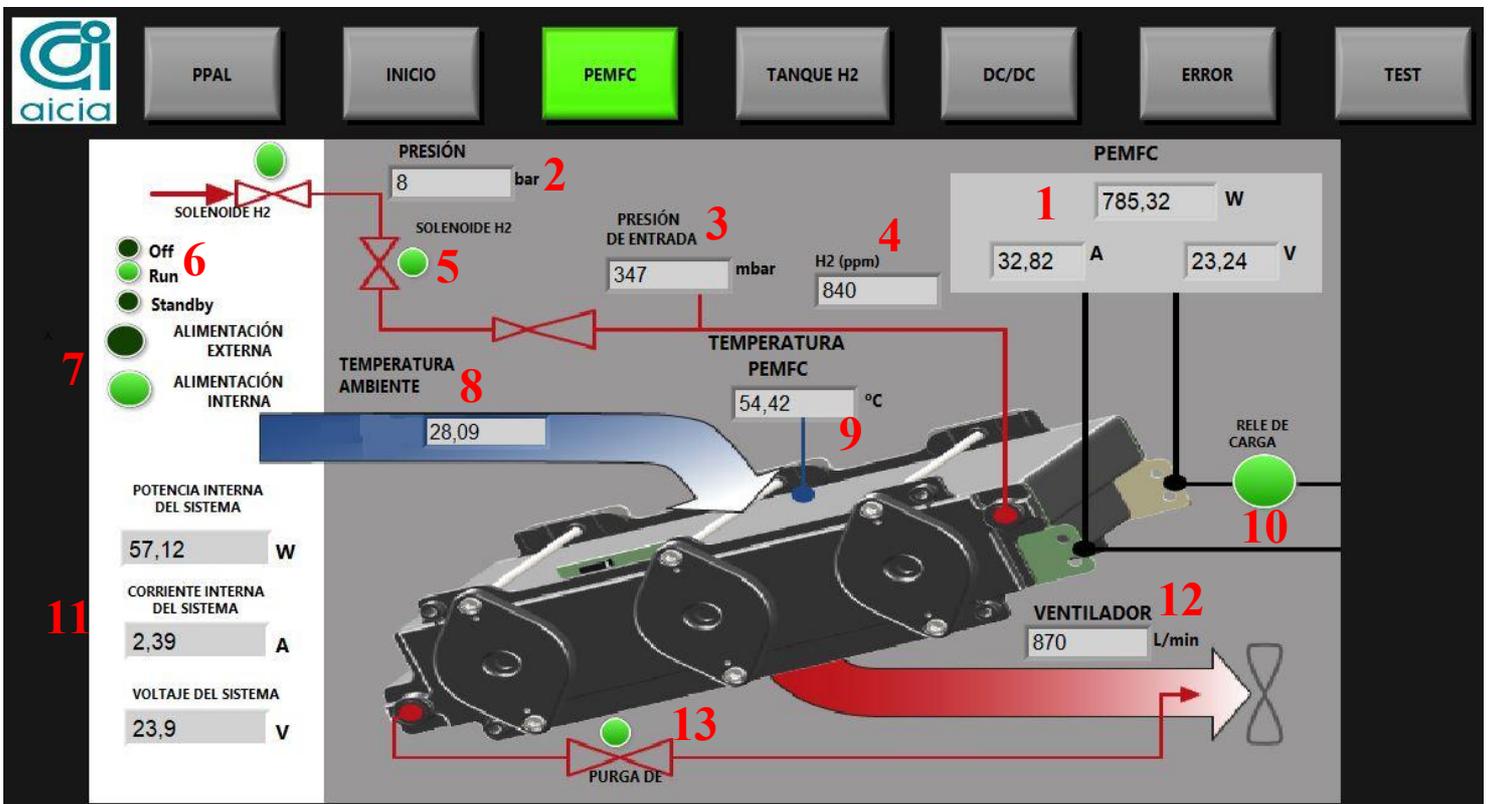


Figura 34 – Pantalla PEMFC

5.1.3.4 Pantalla Tanque H2

En esta pantalla se muestra al usuario la información concerniente a los sensores integrados en el sistema de almacenamiento y distribución del hidrógeno. En la siguiente tabla se detalla junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Evolución de la presión en el depósito de H_2	1
Presión de entrada a la FC	2
Temperatura interna del depósito de H_2	3
Presión actual en el depósito de H_2	4

Tabla 12 - Información en Pantalla Tanque H2



Figura 35 – Pantalla Tanque H2

5.1.3.5 Pantalla DC/DC

En esta pantalla se muestra al usuario la información proveniente del convertidor DC/DC. En la siguiente tabla se detalla junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Potencia de salida	1
Corriente y tensión a la entrada	2
Corriente y tensión a la salida	3
Set point de tensión y corriente de entrada	4
Set point de tensión y corriente de salida	5
Voltaje de referencia del convertidor	6

Tabla 13 - Información en Pantalla DC/DC

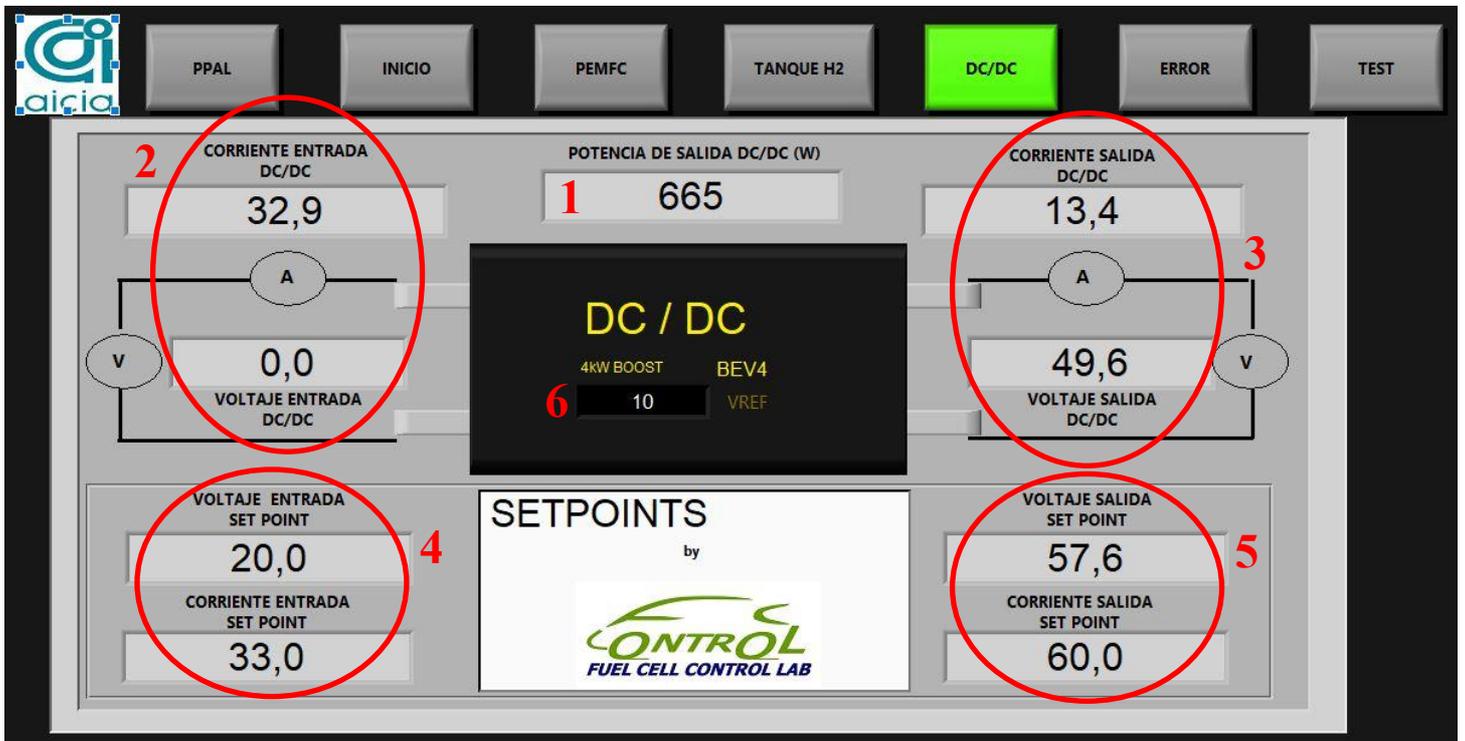


Figura 36 – Pantalla DC/DC

5.1.3.6 Pantalla Error

En esta pantalla se muestra al usuario la información relativa a los errores. Estos pueden provenir de la pila de combustible, la información del convertidor o la comunicación mediante CAN o puerto serie. Además, se encuentran en esta pantalla los botones para resetar las comunicaciones.

En la siguiente tabla se especifica la información mostrada junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Errores provenientes de la PEMFC	1
Errores de funcionamiento del convertidor	2
Comunicación CAN. Errores y Reset	3
Comunicación Serie. Errores y Reset	4

Tabla 14 - Información en Pantalla Error

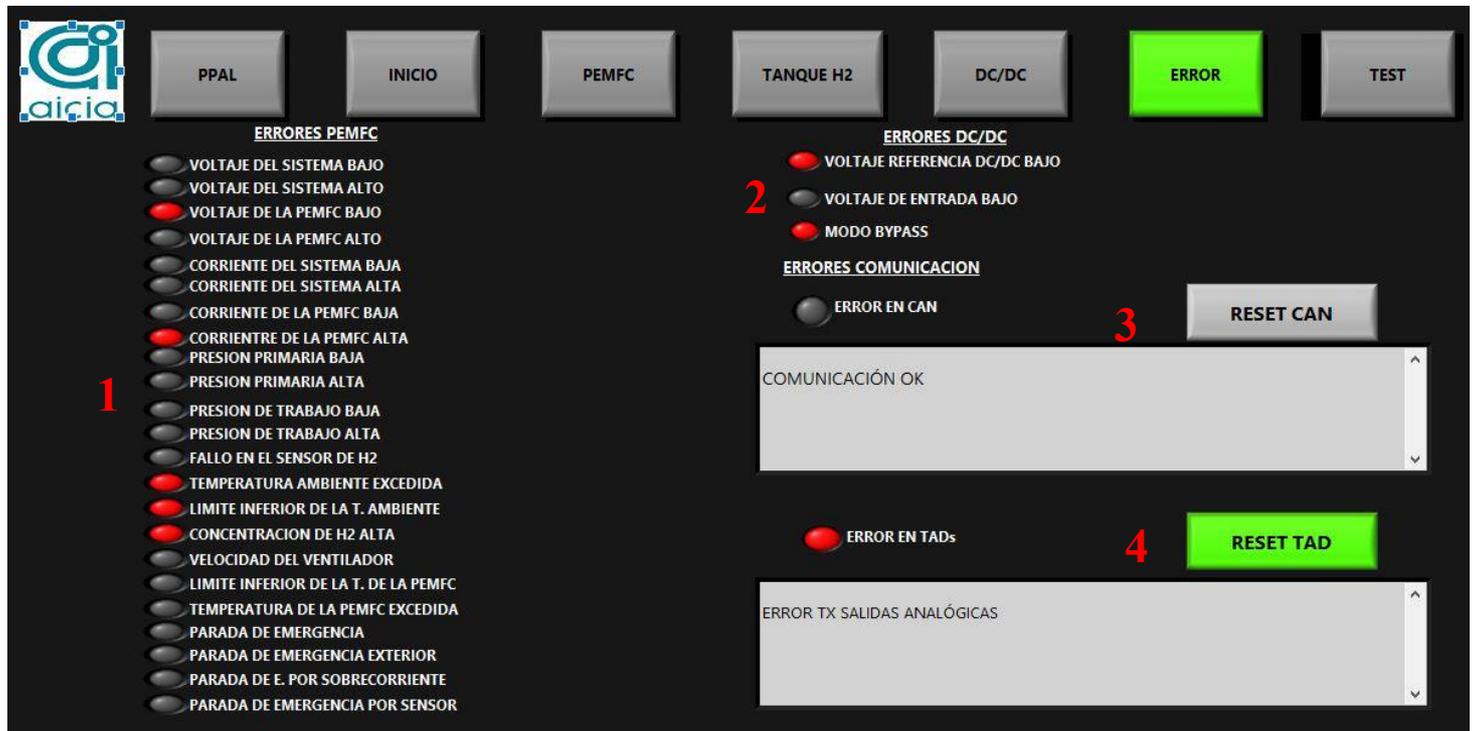


Figura 37 – Pantalla Error

5.1.3.7 Pantalla Test

En esta pantalla se ofrece al usuario los mandos para la demanda de potencia y el control de la PEMFC. Así mismo, se muestra información de los setpoints calculados en base a la potencia solicitada y la tensión de baterías. Además, se encuentran en esta pantalla los botones para fijar los límites del rango de carga para el modo de operación automático.

En la siguiente tabla se especifica la información expuesta junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Selector de potencia a la entrada del convertidor	1
Botón para solicitar la potencia seleccionada	2
Setpoints de tensión e intensidad para el convertidor	3
Intensidad medida a la entrada del convertidor	4
Tensión de baterías	5
Límite de tensión superior para carga de baterías en modo Auto	6
Límite de tensión inferior para carga de baterías en modo Auto	7
Controles manuales para la PEMFC	8

Tabla 15 - Información en Pantalla Test

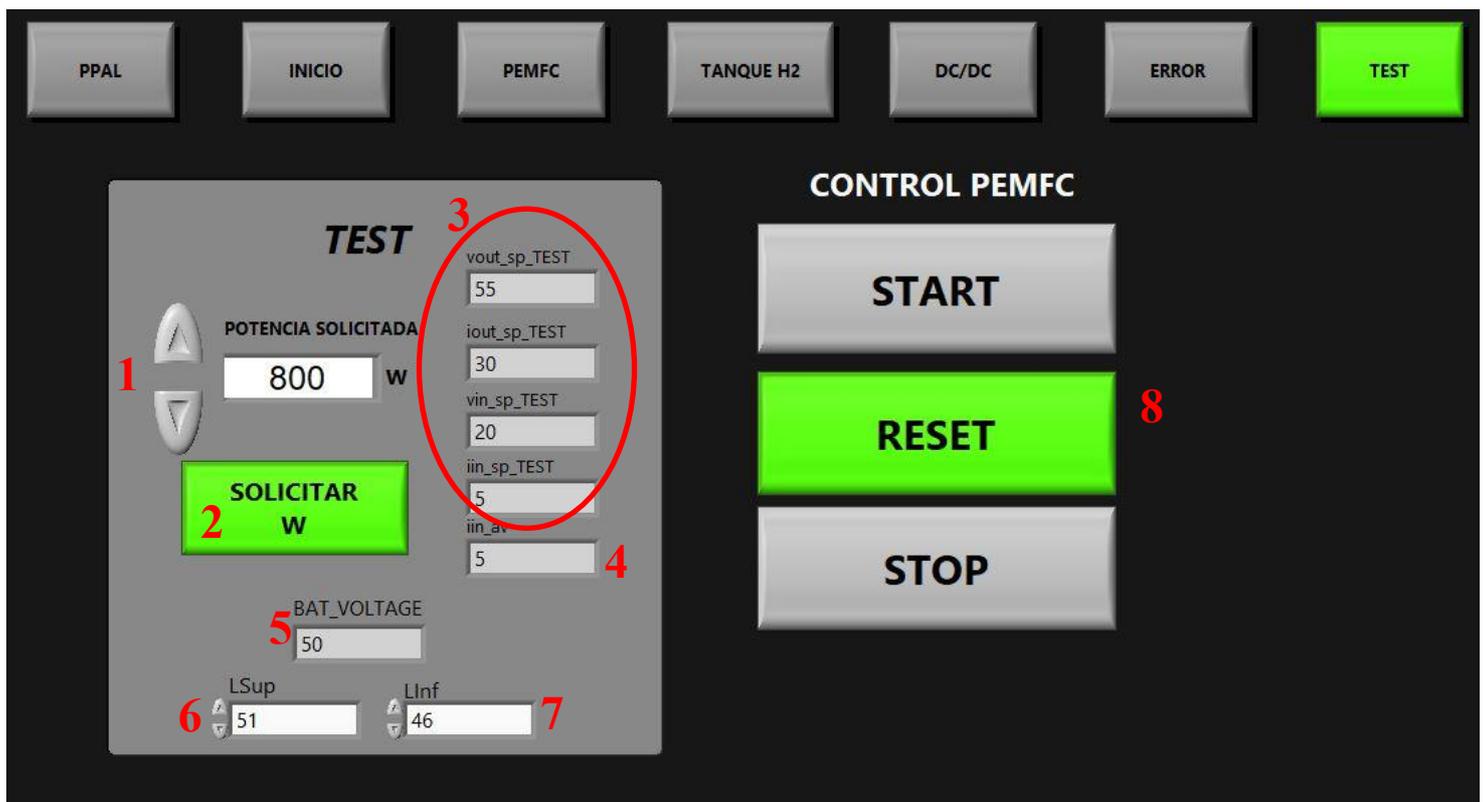


Figura 38 – Pantalla Test

5.1.4 Modo Auto – Control –

En este apartado se explica el modo de funcionamiento automático del sistema de propulsión de hidrógeno que hace uso del algoritmo de control implementado. Este modo de operación es con el que el sistema se inicia automáticamente al ejecutar la aplicación de control y supervisión instalada en el ordenador de a bordo.

Se trata de un control heurístico, ya que se establecen las reglas de funcionamiento en base al conocimiento obtenido de la pila de combustible de manera experimental.

Se formula el algoritmo en base a una serie de condiciones que deben darse simultáneamente para que se pueda solicitar potencia a la FC de manera segura para ésta y para el resto de componentes electrónicos integrados a lo largo del bus de potencia. Así, se programan los siguientes pasos que sigue el algoritmo de control y las acciones establecidas en base a las condiciones que se dan en cada momento.

1. En primer lugar, se comprueba si hay algún error o valor de algún parámetro incompatible con la demanda de potencia. Esto es, que se haya activado la señal de paro de la FC – Comando *Stop* –, que se detecte que el convertidor está en *bypass* o que la tensión de las baterías³ esté por encima del límite superior de tensión fijado.

En caso de que alguno de estos parámetros se cumpla, se activa la señal de paro de la FC y se desactiva la señal de carga de las baterías. Si por el contrario ninguno de estos valores se da, se continúa con la siguiente condición

2. En segundo lugar, se comprueba que la tensión de las baterías esté en el rango establecido para la carga de las baterías. Este rango se fija a través de los controles ubicados en la pantalla *Test* y se implementa una lógica booleana de manera que la señal de carga se mantiene activa según se muestra en la imagen a continuación.

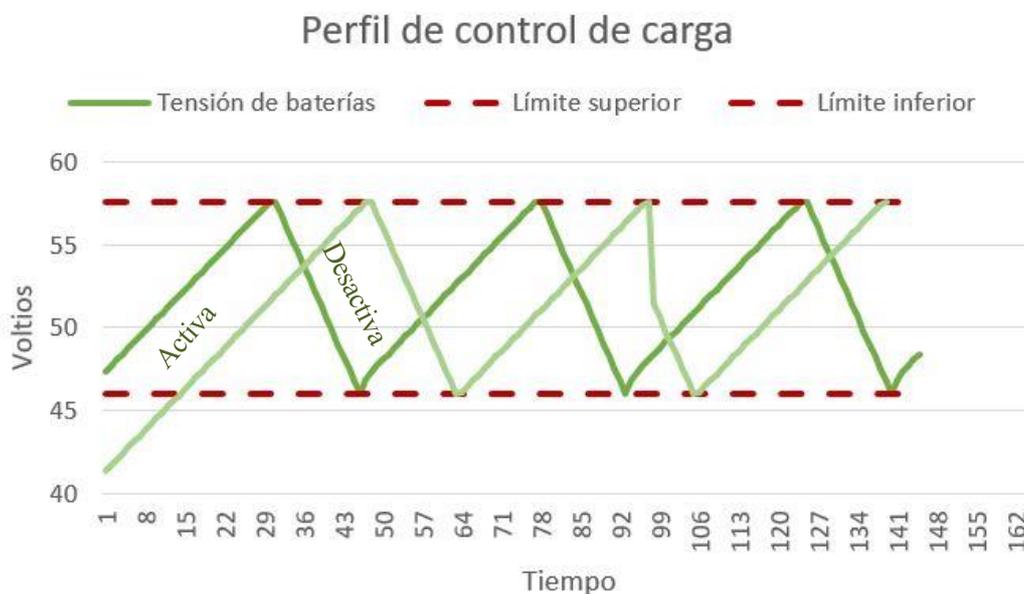


Figura 39 - Perfil de control de carga de baterías

Si la señal de carga está activa, significa que las baterías están listas para comenzar a ser cargadas o continuar el proceso de carga y se avanza a la siguiente condición. En caso contrario, se entiende que las baterías ya están cargadas y se procede a activar la señal de paro de la pila.

3. Llegados a este punto, se comprueba que efectivamente la pila de combustible esté funcionando correctamente. En caso de no ser así, se activa ha fijado un protocolo para que se activen los comandos de *Reset* y *Start* convenientemente hasta llevar a la FC al estado de funcionamiento apropiado.

³ Se establece el estado de carga (SOC) en base a la tensión de baterías

4. Por último, se van estableciendo los setpoints de las tensiones e intensidades del convertidor en base a los niveles de potencia solicitados, según el bucle encargado de ello que se ha explicado en apartados anteriores.

El modo *Auto* se ejecutará hasta que las baterías estén cargadas, o hasta que el usuario decida detenerlo, bien pasando al modo *Test* o bien parando la pila de combustible.

A continuación, se muestran las entradas y salidas del algoritmo de control.

Entradas [tipo] ⁴	Salidas [tipo]
Comando <i>Stop</i> de FC [B]	Carga de baterías [B]
Condición de Bypass del convertidor [B]	Comando <i>Reset</i> de FC [B]
Tensión de salida de FC [N]	Comando <i>Start</i> de FC [B]
Tensión de baterías [N]	Comando <i>Stop</i> de FC [B]
Límite de tensión superior para carga de baterías en modo Auto [N]	Setpoint U_{out} del convertidor [N]
Límite de tensión inferior para carga de baterías en modo Auto [N]	Setpoint I_{out} del convertidor [N]
Nivel de potencia solicitada a la FC [C]	Setpoint U_{in} del convertidor [N]
	Setpoint I_{in} del convertidor [N]

Tabla 16 – Entradas/Salidas Modo Auto –Control –

5.1.5 Modo Test

El modo *Test* o modo de operación manual se implementa para dotar de flexibilidad al algoritmo de control de manera que se puede manejar a voluntad la potencia solicitada a la pila de combustible. Este modo puede ser utilizado para distintos fines, como por ejemplo, probar nuevas estrategias de funcionamiento del sistema de propulsión, para solucionar posibles mal funcionamientos que el modo *Auto* no es capaz de solventar por sí mismo o para comprobar el estado en que se encuentra la PEMFC.

La operación en modo *Test* debe ser activada por el usuario en la pantalla *Inicio* mediante el botón habilitado para ello. Una vez activado, el control de los distintos parámetros se realiza a través de la pantalla *Test*, donde se encuentran los mandos para la pila de combustible, el selector de potencia solicitada y el botón para ejecutar la orden de solicitud de dicha potencia.

Hay que tener en cuenta que tanto para el modo *Auto* como *Test*, la potencia solicitada es la que será demandada en las bornes de entrada del convertidor y se regula en intensidad de entrada y tensión de salida. El cálculo se realiza:

$$I_{in}SP = P_{in}^{Solicitada} / U_{in}AV$$

$$U_{out}SP = 57.6 V$$

Se mantiene el setpoint de la tensión de salida constante en el máximo de tensión de baterías para que siempre la corriente vaya en dirección a las baterías hasta que estén cargadas. Además, la intensidad y la potencia de entrada del convertidor se limitan a 40 amperios a 1100 vatios respectivamente para evitar dañar tanto la FC como el convertidor.

⁴ Indica el tipo de dato: B → Booleano N → Numérico C → Cadena de caracteres

A continuación, se muestran las entradas y salidas en el modo *Test*.

Entradas [tipo] ⁵	Salidas [tipo]
Tensión de baterías [N]	Comando <i>Reset</i> de FC [B]
Intensidad de entrada del convertidor [N]	Comando <i>Start</i> de FC [B]
	Comando <i>Stop</i> de FC [B]
	Setpoint Uout del convertidor [N]
	Setpoint Iout del convertidor [N]
	Setpoint Uin del convertidor [N]
	Setpoint Iin del convertidor [N]
	Nivel de potencia solicitada a la FC [N]
	Solicitud de Potencia [B]

Tabla 17 – Entradas/Salidas Modo Test

5.1.6 Guardado de datos

El almacenamiento de los datos generados durante la utilización del vehículo junto con el sistema de propulsión de hidrógeno es una parte fundamental para obtener una comprensión profunda del funcionamiento del sistema.

El hecho de guardar esta la información hace que sea posible llevar a cabo un análisis que permita seguir investigando sobre la tecnología basada en hidrógeno mediante el uso de pilas de combustible y también facilita enormemente las tareas de mantenimiento que haya que realizar.

Como se ha comentado anteriormente, el guardado de datos se realiza en paralelo con la ejecución del algoritmo de control y supervisión para conseguir una temporización independiente del resto de bucles. Así, el almacenamiento de la información se ejecuta una vez por segundo. El funcionamiento es el siguiente:

1. Al iniciarse la aplicación, se comienza el guardado de datos. Para ello, en primer lugar se genera un archivo de texto plano cuyo nombre será la fecha y hora con formato día_mes_año_hora_minuto_VAR.txt .
2. Tras crear el archivo, se escriben las cabeceras de los datos que se irán almacenando durante el desarrollo de la actividad del sistema de hidrógeno. La escritura de las cabeceras sólo ocurre la primera vez que se abre el archivo.
3. Una vez se ha creado el documento y se han escrito las cabeceras, se comienza a guardar la toda la información generada durante la ejecución del software de control y supervisión.

El bucle de guardado de datos se mantiene en marcha hasta que se pulse el botón *Stop* de la pantalla *Principal* que hace que se detenga el almacenamiento de datos y se cierre el archivo de texto.

Un ejemplo del archivo que se genera se puede encontrar en el anexo A3.

Las entradas/salidas del guardado de datos y la información almacenada se muestran en las siguientes tablas.

Entradas [tipo]	Salidas
Señal <i>Stop</i> [B]	Fichero .txt con la información generada
Señal <i>Datos</i> [B]	
Fecha y Hora [C]	
Dirección de guardado [C]	

Tabla 18 – Entradas/Salidas Bucle guardado de dato

⁵ Indica el tipo de dato: B→ Booleano N→ Numérico C→ Cadena de caracteres

Información almacenada
Potencia salida del convertidor
Tensión salida del convertidor
Tensión entrada del convertidor
Setpoint tensión salida del convertidor
Setpoint tensión entrada del convertidor
Corriente salida del convertidor
Corriente entrada del convertidor
Setpoint corriente salida del convertidor
Setpoint corriente entrada del convertidor
Tensión de referencia del convertidor
Potencia salida de FC
Presión del depósito de H_2
Temperatura del depósito de H_2
Presión de entrada de H_2 a FC
Activación válvulas FC
Tensión de salida de FC
Corriente de salida de FC
Corriente autoconsumo FC
Temperatura interna de FC
Warnings flags de FC
Concentración de H_2 en FC
Presión de operación de H_2 interna FC
Tensión autoconsumo FC
Temperatura ambiente
Estado de funcionamiento de FC
Velocidad del ventilador de FC
Info flags FC
Presión de entrada de H_2 a FC (medido por FC)
Errores de FC e info reservada (17 columnas)
Ejecución en Modo Auto
Ejecución en Modo Test
Ejecución detenida
Comando Start de FC
Comando Stop de FC
Comando Reste de FC
Solicitud de potencia a la entrada del convertidor
Potencia solicitada a la entrada del convertidor

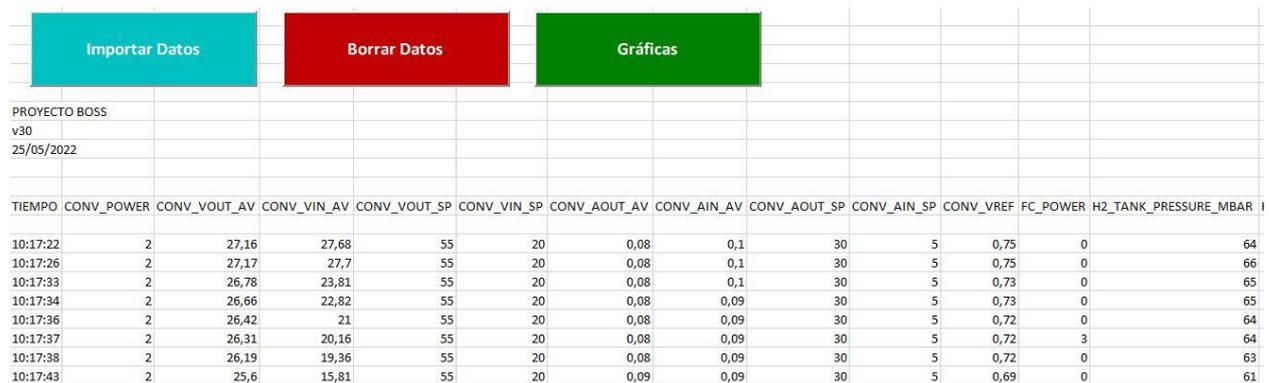
Tabla 19 – Información almacenada en .txt

5.2 Excel

Si bien el algoritmo principal del software de control y supervisión se ha programado en LabVIEW, también se han desarrollado una serie de macros para Excel utilizando el lenguaje de programación VBA.

Esta programación se utiliza para el análisis de los datos almacenados en el archivo de texto creado por el LabVIEW. De esta manera se consigue automatizar el tratamiento de la información y simplificar la visualización de ésta a través de la creación de gráficas con los datos más relevantes.

La ejecución de las macros se implementa a través de botones para hacer el uso lo más sencillo posible. En la siguiente imagen se muestra el Excel realizado.



TIEMPO	CONV_POWER	CONV_VOUT_AV	CONV_VIN_AV	CONV_VOUT_SP	CONV_VIN_SP	CONV_AOUT_AV	CONV_AIN_AV	CONV_AOUT_SP	CONV_AIN_SP	CONV_VREF	FC_POWER	H2_TANK_PRESSURE_MBAR	
10:17:22	2	27,16	27,68	55	20	0,08	0,1	30	5	0,75	0		64
10:17:26	2	27,17	27,7	55	20	0,08	0,1	30	5	0,75	0		66
10:17:33	2	26,78	23,81	55	20	0,08	0,1	30	5	0,73	0		65
10:17:34	2	26,66	22,82	55	20	0,08	0,09	30	5	0,73	0		65
10:17:36	2	26,42	21	55	20	0,08	0,09	30	5	0,72	0		64
10:17:37	2	26,31	20,16	55	20	0,08	0,09	30	5	0,72	3		64
10:17:38	2	26,19	19,36	55	20	0,08	0,09	30	5	0,72	0		63
10:17:43	2	25,6	15,81	55	20	0,09	0,09	30	5	0,69	0		61

Figura 40 - Detalle interfaz en Excel

5.2.1 Tratamiento de los datos

Los algunos de los datos almacenados en el archivo de texto necesitan ser tratados, ya que no representan los valores reales de las magnitudes físicas que representan. Los datos procedentes del convertidor por ejemplo se guardan en órdenes de magnitud elevados para no perder decimales al recopilarlos o la potencia generada por la pila de combustible, a veces, registra algún valor erróneo.

Para que el usuario no pierda tiempo haciendo el tratamiento manual de estos datos, se implementa en el Excel el botón *Importar Datos*.

Al pulsar este botón, se abre el explorador de archivos para que el usuario seleccione el archivo de texto donde están los datos que quiere analizar. Tras seleccionar el archivo, se ejecuta la macro de Excel que lleva a cabo el tratamiento de la información, dejándola preparada para su estudio.

5.2.2 Visualización de la información

Una vez se tiene toda la información procesada, se puede hacer uso del algoritmo para la generación automática de gráficas con los datos más relevantes del funcionamiento del vehículo.

La ejecución de esta macro se realiza a través del botón *Gráficas*. Las gráficas generadas se crean en una nueva pestaña dentro del mismo archivo.

La información graficada es:

Gráficas generadas automáticamente	Información representada
Datos del convertidor	Tensión y corriente de entrada y salida, Setpoint de tensión a la salida y Setpoint de corriente a la entrada del convertidor
Potencias	Potencia generada por la FC, Potencia solicitada a la entrada y Potencia de salida del conv.
Temperatura FC	Temperatura interna de la FC
Ventilación	Velocidad del ventilador de la FC
Presión depósito H2	Presión interna del depósito de hidrógeno

Tabla 20 - Información graficada automáticamente

Éstas se muestran junto con los resultados en el siguiente capítulo.

Se añade también, otro botón *—Borrar Datos—*, cuya función es la de eliminar toda la información del documento. Esto puede ser útil si se desean analizar varios ficheros de datos en el mismo archivo Excel.

6 IMPLEMENTACIÓN EN EL VEHÍCULO

El verdadero progreso es el que pone la tecnología al alcance de todos.

- Henry Ford -

La integración en el vehículo de los elementos que componen el sistema de propulsión basado en hidrógeno se lleva a cabo una vez se han realizados las pruebas de caracterización correspondientes. La pila de combustible, junto con su electrónica auxiliar (relé de carga, diodo con disipador, etc.) y el convertidor, una vez ensayados en el laboratorio, son reinstalados en el vehículo en su posición original.

Los cambios más notorios se detallan a continuación.

6.1 Pantalla

El sistema de control y supervisión se desarrolla de forma que el usuario pueda interactuar con el sistema de propulsión del vehículo de manera intuitiva. Para ello, la interfaz escogida es una pantalla táctil a través de la cual se puede ir navegando por las distintas interfaces implementadas.

Cabe mencionar que el Melex disponía de una pantalla originalmente, pero debido a su antigüedad y a las condiciones de uso, no está operativa. En su lugar, se ha integrado una nueva pantalla de 10 pulgadas (más grande que la anterior), por lo que se ha fabricado un soporte a medida para poder adaptarla al vehículo.



Figura 41 - Soporte de pantalla para implementación

6.2 Caja de control

El cambio más relevante en cuanto a la implementación de nuevos componentes en el vehículo se da en los relacionados con la electrónica ubicada en la caja de control.

El sistema original se estaba compuesto por dos ordenadores de a bordo, donde uno de ellos recibía y procesaba toda la información y, una vez tratada, era transmitida al otro ordenador que servía exclusivamente para dar soporte a la visualización. Esto llevaba a la duplicidad de algunos equipos, como tarjetas de adquisición de datos o borneros, aparte de necesitar líneas adicionales de comunicación entre la electrónica y los ordenadores embarcados.

En su lugar, gracias al nuevo desarrollo del software de control y supervisión, se hace uso de un solo ordenador de a bordo, en el que se implementa tanto el tratamiento de la información (recepción, envío, procesamiento, etc.) como la supervisión del sistema a través de la interfaz creada.

La instrumentación embarcada ha sido reemplazada por completo, quedando sólo los convertidores DC/DC y los ventiladores de la configuración original.

Si bien en la disposición original había 11 elementos – entre borneros, sistemas de adquisición de datos (E/S analógicas y digitales), líneas de transmisión, fuentes de alimentación dedicadas, ordenadores de a bordo y placas de relés –, con la nueva configuración, se ha pasado a tener sólo 3 elementos.

Esta drástica reducción de componentes electrónicos en la caja de control supone también a una fuerte disminución del cableado empleado, lo que facilita radicalmente las tareas de mantenimiento y la comprensión del sistema en su conjunto.

En la tabla se detallan los componentes integrados en la caja de control.

Componente	Función
PCM-3365 (PC104)	Ordenador de a bordo. Control y supervisión
TAD i-7017	Entradas analógicas
TAD i-7024	Salidas analógicas
TAD i-7520	Conversión RS-2485/RS-232
Convertor RS-232 a USB	Facilitar conexión con PC104
Convertor CAN a USB	Facilitar conexión con PC104
Ventiladores	Refrigeración de la electrónica
Fichas de empalme	Facilitar el conexionado de 12V y 5V
Convertidor DC/DC 48/24V	Alimentación PEMFC y resto de convertidores
Convertidor DC/DC 24/5V	Alimentación sensores, PC104,
Convertidor DC/DC 24/12V	Alimentación TADs, ventiladores, PC104, pantalla, convertidor BEV4

Tabla 21 – Componentes en caja de control

6.2.1 Disposición de componentes

En este apartado se muestra la renovación de la electrónica embarcada que ha sufrido la caja de control. En las imágenes a continuación pueden apreciarse las configuraciones de la caja de control original y actual.

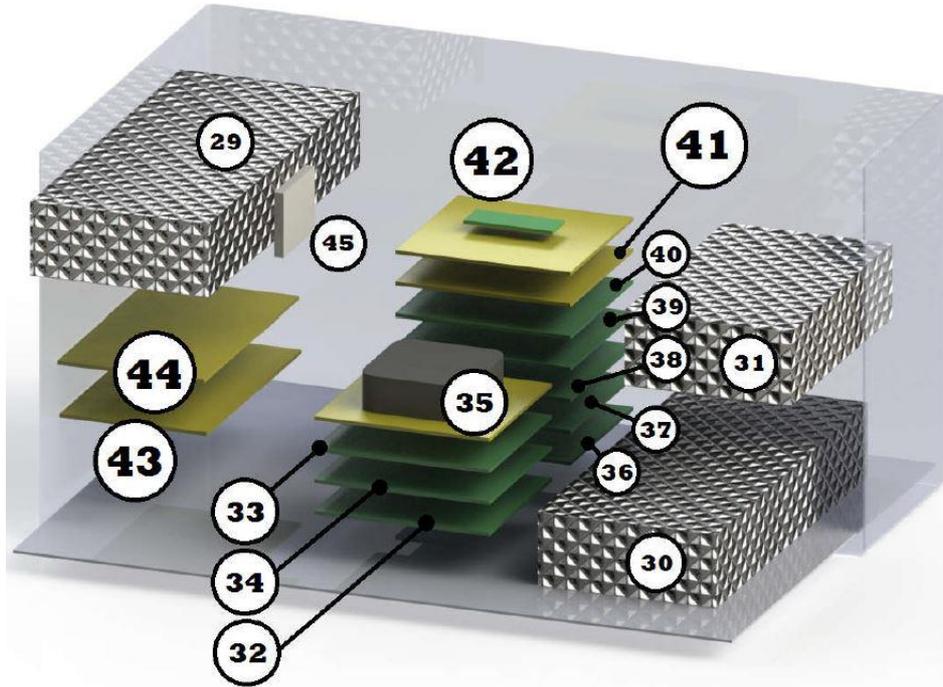


Figura 42 – Configuración de la caja de control original

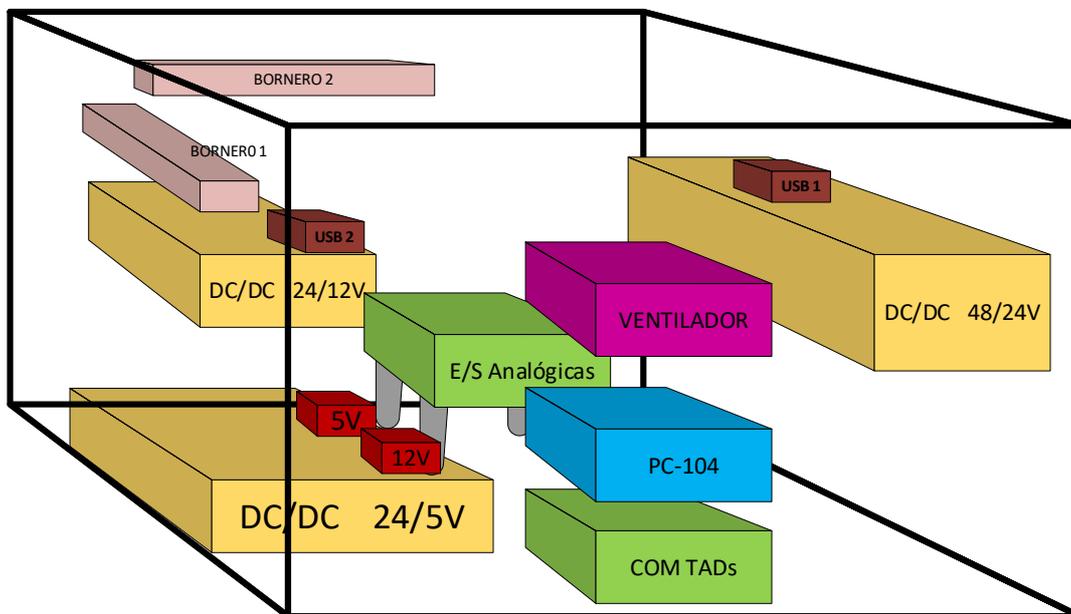


Figura 43 - Configuración actual de la caja de control

Como se puede observar, la simplificación de la caja de control es notable.

6.2.2 Conexionado

Aprovechando la integración de los nuevos componentes, se han identificado todos los cables instalados y se ha realizado un esquema explicativo del conexionado, documentación de la que el sistema original carecía.

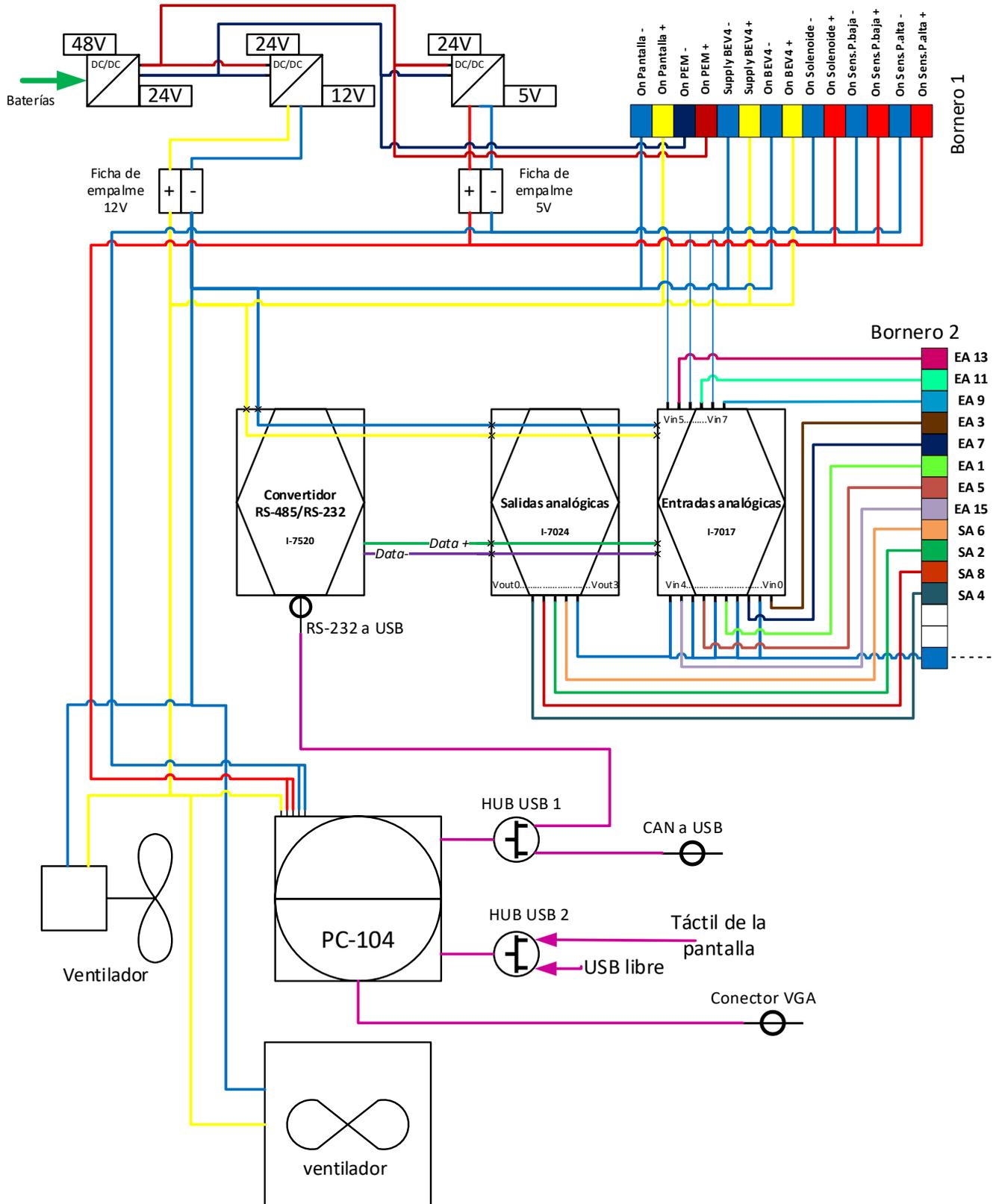


Figura 44 – Esquema de conexionado de la caja de control

Los cables del *bornero 1* son cables de alimentación y se entiende que con el diagrama anterior queda suficientemente especificado su origen, destino y función.

A continuación, se detalla la información que porta de cada cable de las entradas y salidas analógicas, junto con su origen, destino e identificación en la caja de control.

Información	Origen	Destino	Etiqueta
U_{inAV}	Bornero 2	Entradas analógicas Ch2	EA 1
U_{outAV}	Bornero 2	Entradas analógicas Ch0	EA 3
I_{inAV}	Bornero 2	Entradas analógicas Ch3	EA 5
I_{outAV}	Bornero 2	Entradas analógicas Ch1	EA 7
Presión depósito h_2	Bornero 2	Entradas analógicas Ch7	EA 9
Presión entrada FC	Bornero 2	Entradas analógicas Ch6	EA 11
Temperatura depósito h_2	Bornero 2	Entradas analógicas Ch5	EA 13
Tensión referencia TADs	Bornero 2	Entradas analógicas Ch4	EA 15
U_{inSP}	Bornero 2	Salidas analógicas Ch2	SA 2
U_{outSP}	Bornero 2	Salidas analógicas Ch0	SA 4
I_{inSP}	Bornero 2	Salidas analógicas Ch3	SA 6
I_{outSP}	Bornero 2	Salidas analógicas Ch1	SA 8
Negativo del convertidor	Bornero 2	Entradas/Salidas analógicas	----

Tabla 22 – Cableado E/S analógicas

6.3 Componentes del sistema de propulsión híbrido

Elemento		Valores	Notas
Depósito H2	Bobina de la solenoide PWM (Dynetek)	12Vdc 0,5-5 seg / PWM 10KHz con 2±0,2A; 0,9±0,1Adc / PWM 10KHz 0,9±0,1A;	Opciones para abrir la solenoide; Opciones para mantener la solenoide abierta;
	Sensor de temperatura (Dynetek)	-55°C a 130°C / 963000Ω a 300,9Ω	Para ver correspondencias de °C a Ω ver tablas del fabricante.
	Sensor de Presión de hidrógeno (alta) (AST2000)	Excitación 5Vdc; Output 0,5-4,5V; 448Bar; consumo de corriente <10mA	
Sensor de Presión de hidrógeno (baja) (GS4200)		Excitación 13-30Vdc; Output 0-5Vdc; 0-16Bar;	
PEMFC Nexa 1200	PEMFC	Alimentación auxiliar: 110W;12-36Vdc; Output: 20-36Vdc; 65A; 1200W a 5°C-25°C; 1000W a 25°C- 35°C;	Tensión auxiliar mínima del sistema 24Vdc (24-36Vdc). Para más información acudir al manual del fabricante.
	Electroválvula	24Vdc; 0,4A;	
	Relé de carga	24Vdc; <6W;	
	Diodo	Tensión inversa 200V; Intensidad máxima 70A;	
Convertidor (Brandner BEV4)	Convertidor	Alimentación auxiliar: 12Vdc±15%; 1A(2Apeak); Señal de referencia del nivel de alimentación: 0-10Vdc Input: 4KW; 20-80Vdc; 80A; Output: input voltage-100Vdc; 0-65A; Señales analógicas de control y medida: 0-10Vdc	Para más información acudir al manual del fabricante.
	Diodo Bypass	Tensión inversa 200V; Intensidad máxima 70A;	
	Fusibles	Entrada 80A; Salida 50A;	
Caja de control	Conv. DC/DC 48V/24V	Input: 48Vdc (36-72Vdc) Output: 24Vdc; 8,4A; 201,6W;	Para más información acudir al manual del fabricante.
	Conv. DC/DC 48V/12V	Input: 48Vdc (28,8-67,2Vdc) Output: 12Vdc; 25A; 300W;	
	Conv. DC/DC 48V/5V	Input: 48Vdc Output: 5Vdc; 50W;	
	Fusibles	Situados en la entrada y en cada salida de los DC/DC.	
	Fichas de empalme	De 12V y 5V	
	Ventiladores x2	Alimentación: 12V	
	PC 104 Control y Supervisión	PCM-3365	
	Hub USB x2		
	Tarjetas de adquisición de datos (TADs) Fabricante → ICP DAS	i-7017 → Entradas analógicas [0...10V] i-7024 → Salidas analógicas [0...10V] i-7520 → Conversión protocolo de comunicación [RS485 a RS232]	
PCANView	Adaptador CAN a USB		

Tabla 23 – Componentes del sistema de propulsión híbrido

6.4 Software de control y supervisión

El algoritmo en LabVIEW para el control y la supervisión no se ha desarrollado en el PC de a bordo, sino en un ordenador portátil. Esto se debe a que instalar el framework de Labview en el pc embarcado supondría consumir una gran cantidad de recursos de procesamiento y memoria que sólo serían útiles durante el desarrollo de la programación pero que ralentizaría enormemente la ejecución habitual del código.

Así que, en lugar de instalar el framework completo, lo que se ha hecho es generar un archivo auto contenido que se implementa en el ordenador de a bordo mediante un instalador creado en el portátil donde se ha desarrollado.

El proceso de instalación en el ordenador embarcado es el siguiente:

1. Generar un ejecutable y un instalador en el pc donde se ha desarrollado.
2. Copiar la carpeta con el .exe y el instalador creados al ordenador de a bordo y abrir el instalador. Se abre el asistente de instalación y se selecciona la dirección de instalación.

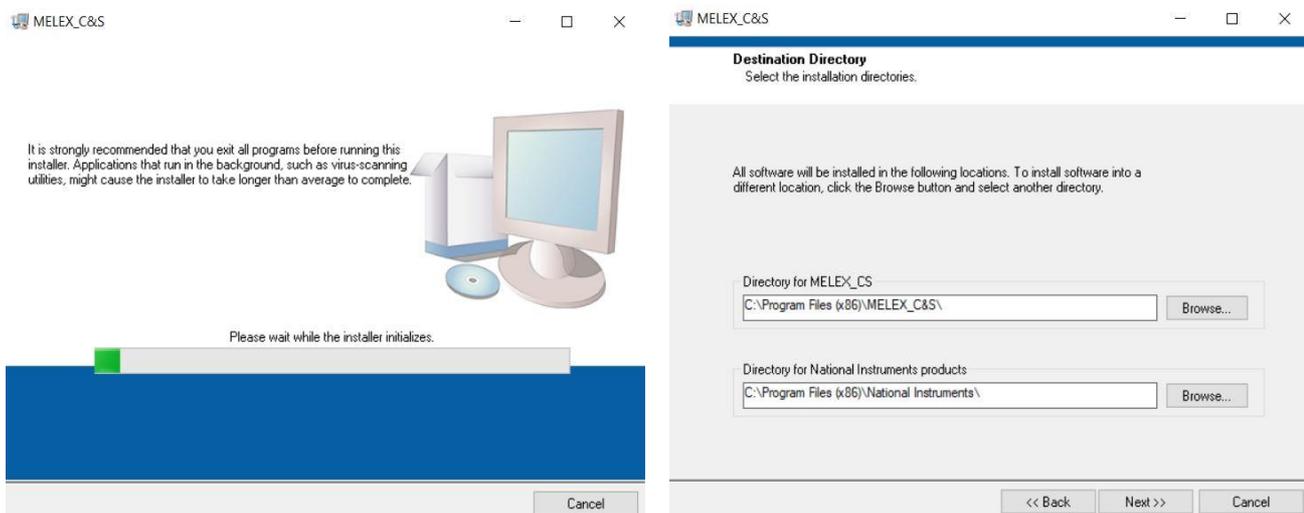


Figura 45 - Instalación del .exe de control y supervisión

3. Una vez instalado el ejecutable, se hace uso del programador de tareas de Windows para que de manera automática, al iniciarse el ordenador de a bordo, se ejecute la aplicación de control y supervisión.

6.5 Resultados experimentales

En este apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos tras la integración del sistema de propulsión híbrido (PEMFC - Convertidor DC/DC - Baterías) junto con la electrónica para el control y supervisión integrada en la caja de control.

6.5.1 Modo Auto

El modo de operación automático maneja la potencia solicitada al sistema de propulsión mediante escalones como se ha explicado en el capítulo anterior.

En la primera imagen se muestra cómo funciona el vehículo al activarse el sistema de hidrógeno cuando el SOC está en el rango de activación del sistema de propulsión a base de hidrógeno (tensión de baterías por debajo de 57.6V).

Se distinguen 3 escalones en la intensidad de entrada al convertidor, correspondientes con los niveles de potencia

solicitados (200, 400 y 700 wátios). Además, se observa como la intensidad medida sigue perfectamente a la demandada (I_{in} SetPoint en la gráfica).

Durante el tramo intermedio, se aprecia como la tensión de baterías (V_{out} Medida) aumenta paulatinamente, esto se debe a que el vehículo no está en movimiento y la pila de combustible está cargando las baterías.

Tanto en la parte inicial como final, se observa una variación de la tensión de baterías, lo que se debe a que el vehículo está en marcha y el motor está consumiendo energía de las baterías.

En la gráfica de las potencias, se muestran las potencias de la FC (azul), la de entrada del convertidor (roja) y la de salida de éste (verde).

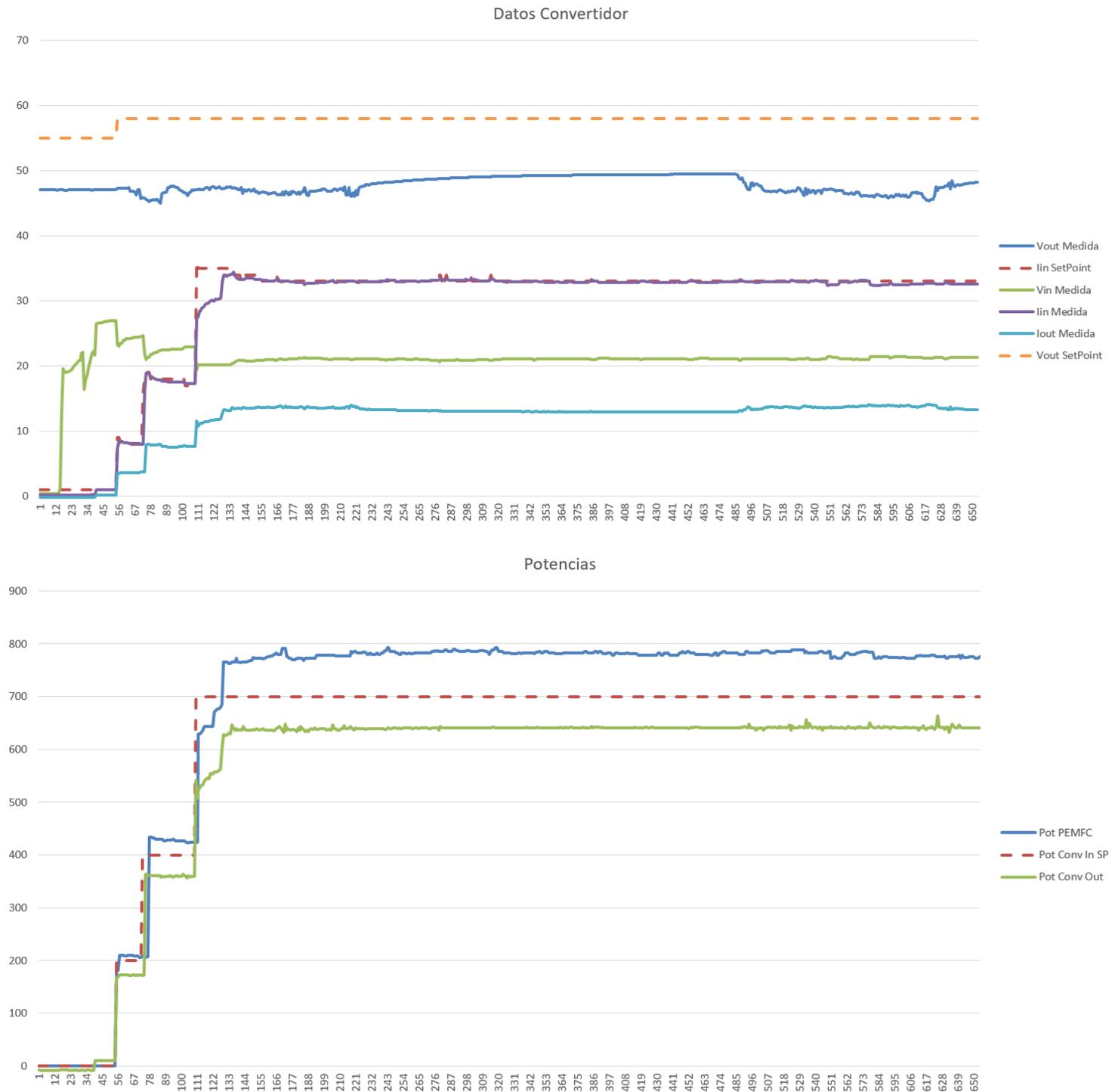


Figura 46 - Resultados experimentales en Modo Auto en conducción

En estas gráficas se muestra cómo el sistema de control implementado detecta que el SOC de baterías se encuentra en el rango de carga establecido y comienza la generación de potencia.

Se observa como el estado inicial de carga de baterías se encuentra por debajo del límite inferior fijado, lo que provoca que la pila comience a generar potencia según los escalones fijados por el control.

Una vez que la tensión de baterías alcanza el límite superior, se desconecta la pila, observándose como de nuevo la tensión de baterías comienza a disminuir. Al llegar al límite inferior, la PEMFC vuelve a activarse y a cargar baterías.

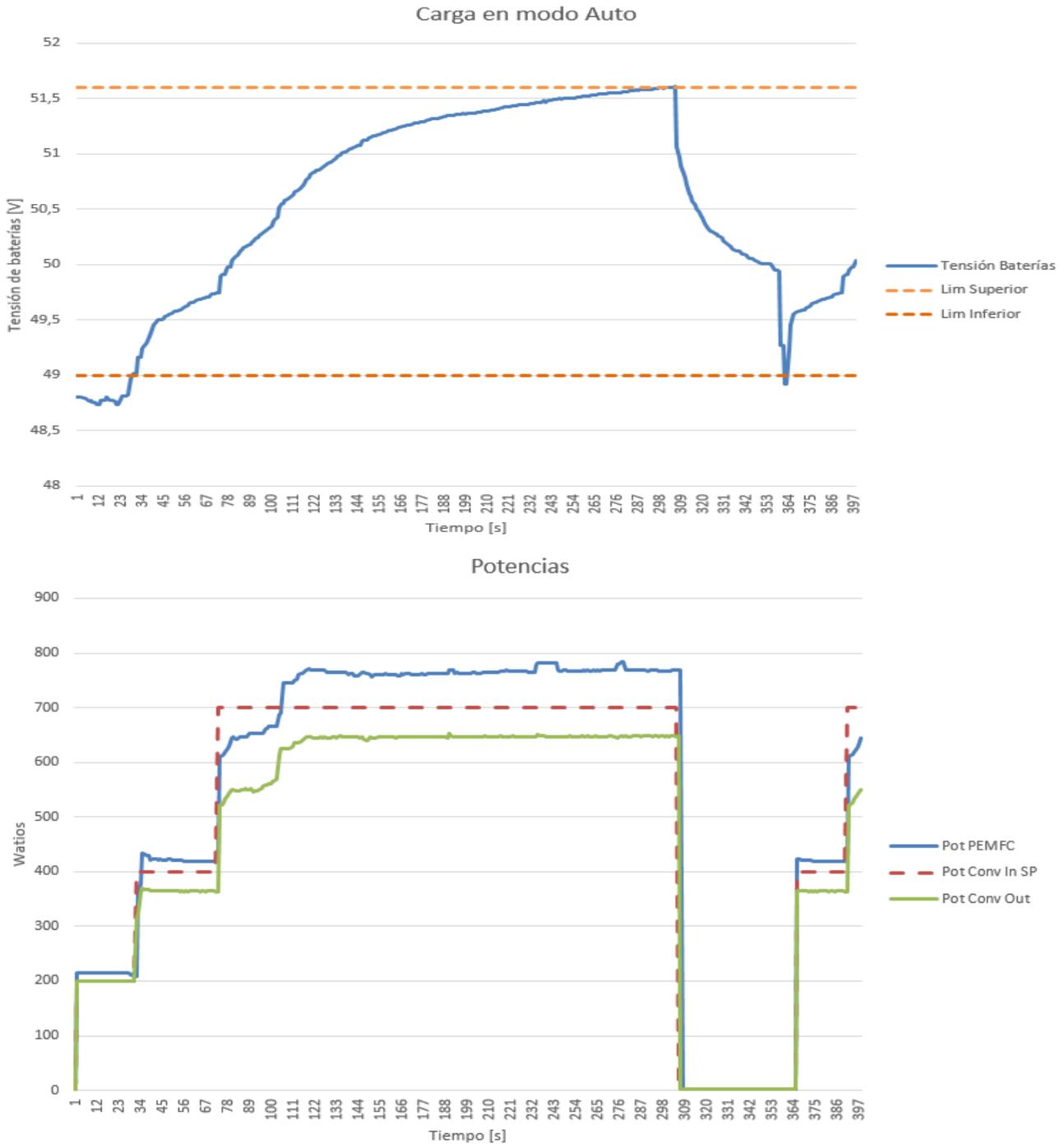


Figura 47 – Resultados Modo Auto según rango de carga

6.5.2 Modo Test

El modo de funcionamiento manual o *Modo Test*, permite que el usuario fije la potencia solicitada al sistema de propulsión. Como se aprecia en la gráfica, el setpoint de potencia se va modificando y se observa que el sistema sigue la referencia establecida.

Al igual que en los resultados del modo *Auto*, el comportamiento de las baterías es el esperado y la única diferencia es la posibilidad de fijar a voluntad la potencia demandada y, por consiguiente, la velocidad de carga de las baterías.

Estos resultados se han obtenido con el vehículo en movimiento, de ahí las variaciones en la tensión de baterías, *Vout Medida* en la gráfica.

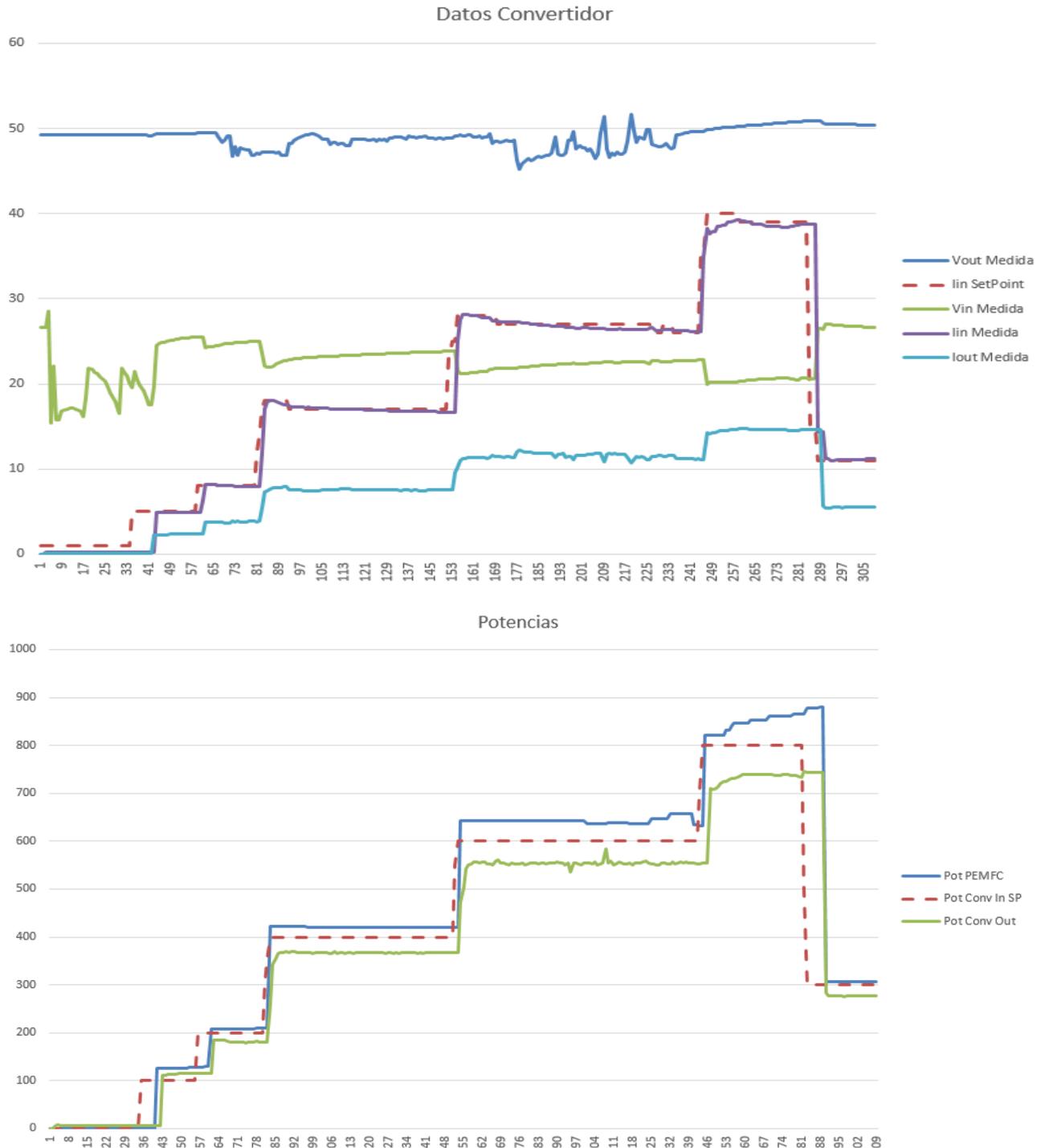


Figura 48 - Resultados experimentales en Modo Test en conducción

6.5.3 Carga de baterías

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras realizar una prueba de carga de baterías con el vehículo estacionado.

Esta prueba se lleva a cabo haciendo uso del modo de operación manual (*Modo Test*) para poder controlar la potencia generada por la pila de combustible. Tras un primer periodo solicitando 700W a la entrada del convertidor, se pasa a 800W para tratar de efectuar la carga lo más rápido posible.

Si bien la pila podría generar más potencia, debido a las pérdidas eléctricas hasta el convertidor y, teniendo en cuenta el límite de tensión inferior del convertidor (20V), hace que 800W sea la potencia máxima que se puede solicitar.

Tras 2 horas de prueba, se puede observar como la tensión de las baterías ha ido subiendo lentamente mientras la corriente absorbida ha ido disminuyendo. Este comportamiento es el esperado en el proceso de carga de baterías.

En la última gráfica, se muestra la evolución de la presión en el depósito de hidrógeno.

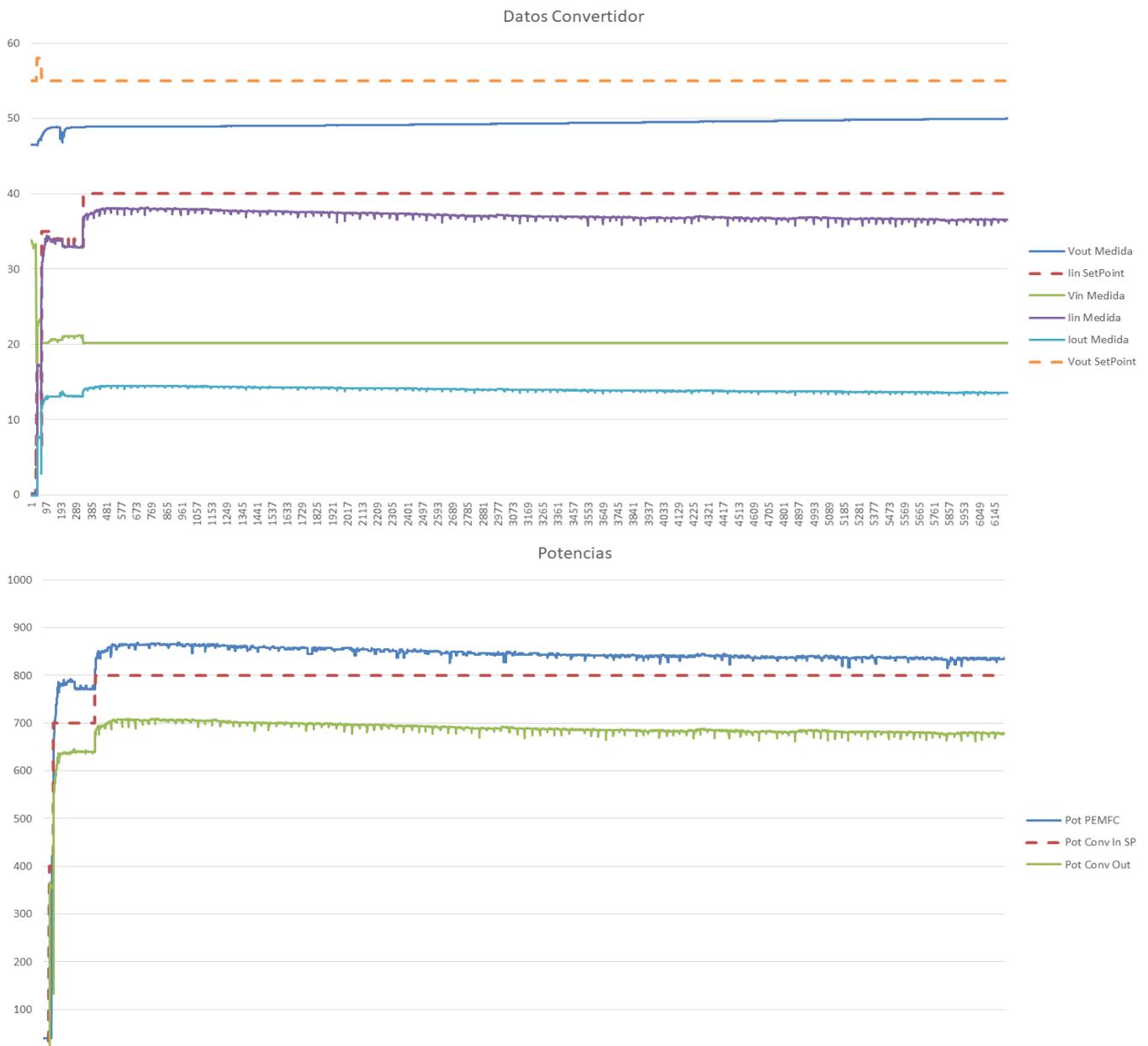


Figura 49 - Resultados experimentales prueba carga de baterías

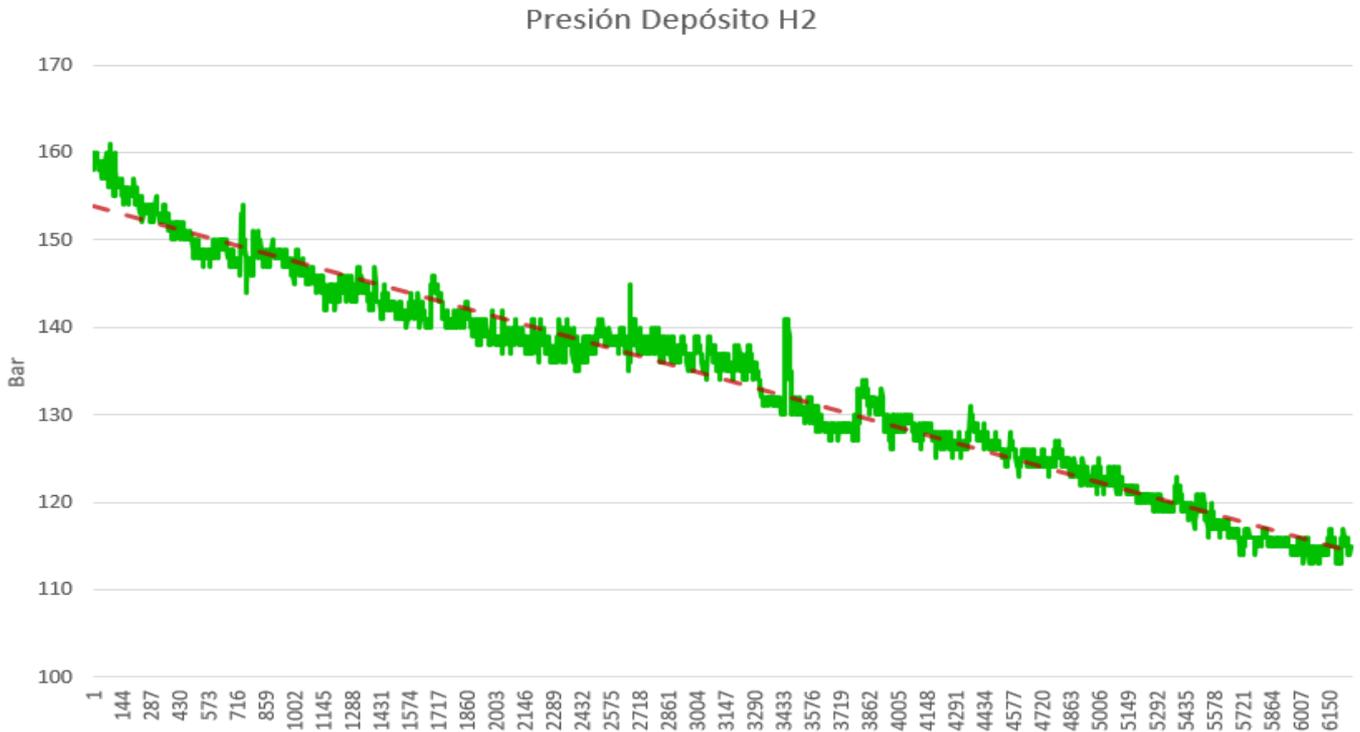


Figura 50 - Evolución depósito H2 durante carga de baterías

Se agrega una línea de tendencia en la gráfica para visualizar la evolución del depósito de hidrógeno para usos de largo periodo. Si la ecuación que describe la evolución de la presión en el tanque se aproxima según:

$$y = -0.0063x + Presión_inicial$$

Y se parte de una presión inicial de 200 bares, que es la máxima a la que se puede recargar en las instalaciones donde se encuentra el vehículo y suponiendo una presión mínima de 15 bares para que el sistema pueda seguir funcionando correctamente, se obtiene una autonomía a máxima potencia de:

$$t = (200 - 15) / 0.0063 = 29.365 \text{ seg} = \mathbf{8h \ 9min}$$

6.5.4 Perfiles de conducción

En este apartado se exponen los distintos perfiles de conducción generados por el vehículo durante su uso en los trayectos habituales que realiza.

El Melex tiene dos modos de conducción, rápido o lento, que se selecciona mediante un interruptor en el panel frontal. El modo de conducción afecta al consumo del vehículo y, por tanto, a los perfiles de conducción obtenidos.

En las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos según el modo de funcionamiento para los mismos recorridos.



Figura 52 - Perfil de conducción en modo lento



Figura 51 - Perfil de conducción en modo rápido

Se observa que cuando se utiliza el modo rápido, las variaciones en la tensión en las baterías son mayores, puesto que el motor demanda más potencia y hace que la tensión oscile en mayor medida.

Las zonas marcadas con el 1 indican aceleraciones, las zonas resaltadas con el 2 se refiere al vehículo inmóvil y las zonas señaladas con el 3 denotan deceleraciones.

6.5.5 Rendimientos

En este apartado se exponen los resultados obtenidos experimentalmente relativos a los rendimientos de los distintos componentes del sistema de propulsión, así como del sistema completo.

6.5.5.1 PEMFC

En cuanto a la pila de combustible, se calcula el rendimiento como la potencia real generada entre la potencia teórica de la pila, calculada a partir de la energía contenida en el hidrógeno consumido, esto es:

$$\eta_{FC} = P_{FC}/P_{H_2} \rightarrow \begin{cases} P_{FC} = V_{out}^{FC} \cdot I_{out}^{FC} \\ P_{H_2} = Q \cdot \rho_{H_2} \cdot PC_{H_2} \cdot t \end{cases}$$

Donde Q es el caudal de hidrógeno consumido por la pila en $\frac{Nl}{h}$, ρ_{H_2} es la densidad del hidrógeno ($0.0899 \frac{kg}{m^3}$), PC_{H_2} es el poder calorífico ($33.3 \frac{Wh}{g}$) y t es el tiempo durante el cual se calcula la potencia teórica en horas.

Dado que se carece de instrumentación para medir el caudal de hidrógeno utilizado, se recurre a calcularlo mediante la información que se obtiene de la presión del depósito de hidrógeno al comienzo y final de la utilización del sistema de propulsión. Haciendo uso de la ecuación de los gases, se calcula el número de moles utilizados:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \cdot Z \rightarrow n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T \cdot Z}$$

$$\text{Al inicio} \rightarrow \frac{160[atm] \cdot 34[l]}{0.082 \left[\frac{atm \cdot l}{mol \cdot K} \right] \cdot 298[K] \cdot 1.1} = 202.38 \text{ mol}$$

$$\text{Al final} \rightarrow \frac{115[atm] \cdot 34[l]}{0.082 \left[\frac{atm \cdot l}{mol \cdot K} \right] \cdot 298[K] \cdot 1.1} = 145.46 \text{ mol}$$

Con lo que se concluye que se han utilizado: $202.38 - 145.46 = 56.92 \text{ mol}$.

Para obtener el volumen en normal litros se vuelve a hacer uso de la fórmula de los gases:

$$1 \cdot V = 56.92 \cdot 0.082 \cdot 298 \rightarrow V = 1390Nl$$

Y la potencia teórica:

$$P_{H_2} = Q \cdot \rho_{H_2} \cdot PC_{H_2} \cdot t \rightarrow \frac{1390 Nl}{2 h} \cdot 0.0899 \frac{kg}{m^3} \cdot 33.3 \frac{Wh}{g} = 2080.6 \text{ Watios}$$

De la gráfica de prueba de carga de baterías (*apartado 7.3.3*) obtenemos el valor promedio de la potencia de salida de la pila de combustible $P_{FC} \cong 850 W$, por lo que el rendimiento medio cuando la pila está en su punto óptimo de funcionamiento:

$$\eta_{FC} = P_{FC}/P_{H_2} = 850/2080.6 = \mathbf{40.85\%}$$

6.5.5.2 Circuito de potencia

Se considera el circuito de potencia como el tramo entre la salida de la pila de combustible y la salida del convertidor hacia las baterías.

Puesto que se tienen datos de todos los parámetros en juego, se puede calcular el rendimiento instantáneo del circuito de potencia. Se escoge como información la prueba de conducción en modo rápido del vehículo por ser la más representativa del funcionamiento real que se le da al Melex.

Se observa en la gráfica que el rendimiento promedio se encuentra en torno al 82.31% $\rightarrow \eta_{pot} \cong 82.31\%$

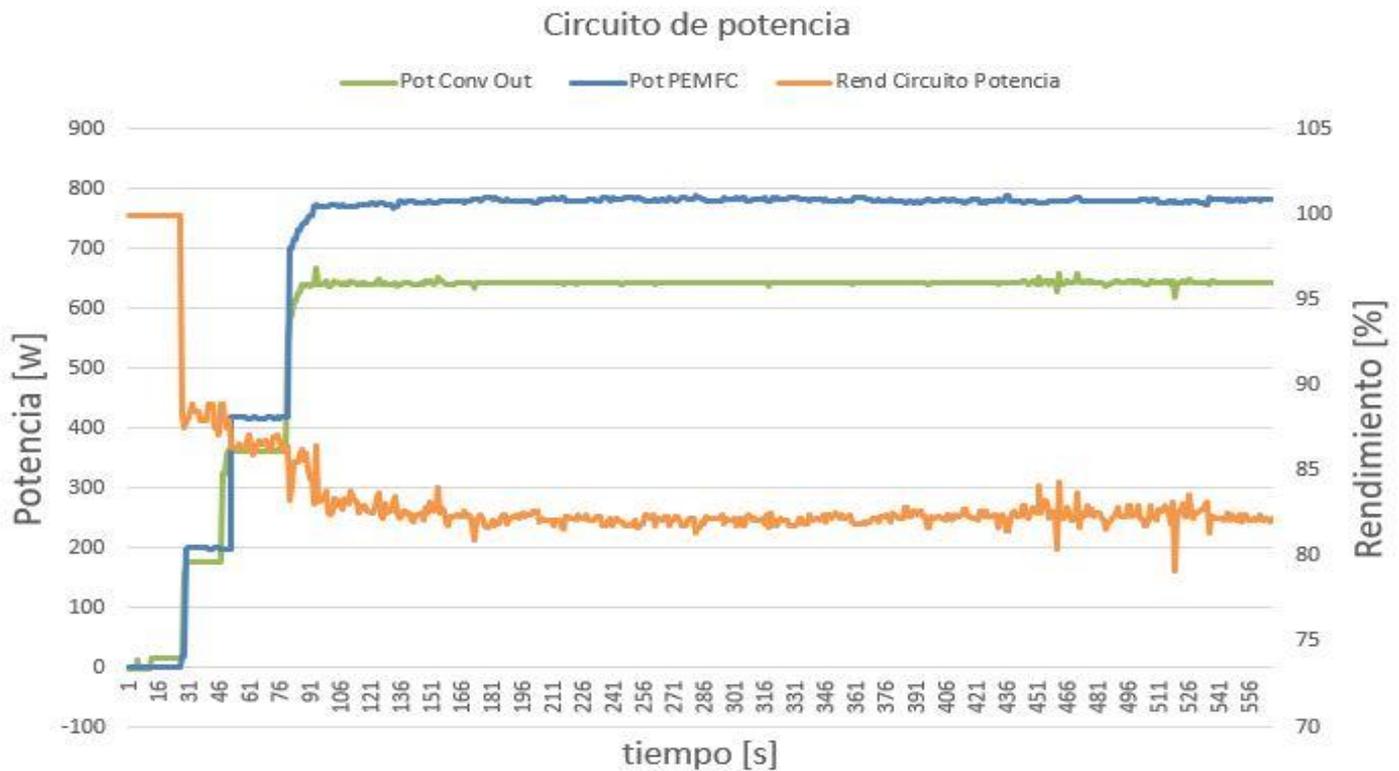


Figura 53 – Rendimiento del circuito de potencia

6.5.5.3 Sistema de propulsión completo

Se considera el rendimiento completo del sistema de propulsión desde la potencia teórica de la pila calculada a partir de la energía contenida en el hidrógeno consumido del tanque hasta la potencia real que es entregada a las baterías del vehículo.

Así se tiene que el rendimiento total del sistema de propulsión es:

$$\eta_{SPH2} = \eta_{FC} \cdot \eta_{pot} = 0.4085 \cdot 0.8231 = 33.62 \%$$

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La tarea del intelectual consiste en el análisis real de las ilusiones con el fin de descubrir sus causas.

Arthur Miller

Tras haber expuesto el trabajo realizado junto con los resultados experimentales obtenidos y, teniendo en cuenta el marco tecnológico y temporal en el que se ha desarrollado, en este capítulo se expresan las conclusiones derivadas del desarrollo y la implementación del sistema de control y supervisión del sistema de propulsión de un vehículo híbrido con pila de combustible.

7.1 Conclusiones

Como conclusiones del trabajo que se ha llevado a cabo, se destacan los siguientes aspectos:

- Se ha conseguido que el Melex sea completamente funcional como vehículo híbrido con un sistema de propulsión basado en pila de combustible.

Se ha llevado a cabo tras realizar un trabajo de ingeniería inversa que ha permitido comprender las peculiaridades del sistema para, a partir de ahí, ser capaz de renovar por completo la instrumentación electrónica encargada del control y la supervisión del sistema a base de hidrógeno.

- Se ha conseguido implementar un algoritmo con capacidad para operar el sistema de propulsión híbrido de manera automática, manteniendo en todo momento la seguridad tanto para el usuario como para los elementos que componen dicho sistema.

El control implementado se ejecuta en paralelo con la supervisión del sistema y la interacción de éste con el usuario del vehículo, consiguiendo mostrar la información generada de manera intuitiva a los ocupantes del Melex.

Esto hace que no se necesite ser experto en la materia para comprender de manera general lo que está sucediendo en el coche, hecho relevante teniendo en cuenta que el Melex es un coche destinado a mostrar a terceras personas el funcionamiento de un vehículo a base de hidrógeno.

- El hecho de haber reemplazado toda la instrumentación electrónica, ha propiciado que se simplifique considerablemente tanto la programación implementada como el conexionado de los distintos componentes electrónicos. Esta simplificación facilita futuros desarrollos y el mantenimiento del todo el sistema.

- Se han caracterizado los componentes del sistema de propulsión a base de hidrógeno (PEMFC y Convertidor DC/DC), lo que conlleva la actualización de la información relativa su estado. Esto ayuda también a hacer un uso en consecuencia y facilita la integración futura de posibles modificaciones en el sistema.
- Tras revisar los resultados experimentales obtenidos, se puede concluir que el sistema actual no es el idóneo para llevar a cabo la carga de las baterías, ya que la tecnología de estas (plomo-ácido) y las características de la pila de combustible hacen que se necesite una gran cantidad de hidrógeno para conseguir cargar mínimamente las baterías.

Sin embargo, el sistema de propulsión híbrido del vehículo sí aporta lo suficiente como para conseguir elevar el tiempo de uso y provee de una plataforma experimental con la que desarrollar nuevos estudios, al tiempo que se utiliza de exposición para personas ajenas a la investigación.

7.2 Líneas futuras de investigación

Atendiendo a los resultados obtenidos en el proyecto y con el conocimiento adquirido, se proponen las siguientes líneas futuras de investigación que podrían mejorar la funcionalidad del vehículo y conseguir un mayor rendimiento del sistema de propulsión a base de hidrógeno:

- Puede resultar de gran interés la implementación de un algoritmo de control avanzado como podría ser un controlador de tipo predictivo o con lógica fuzzy. Se puede partir de los datos obtenidos experimentalmente de los perfiles de conducción del vehículo y las características de la pila de combustible y el convertidor BEV4.

Integrar un control de este tipo optimizaría la demanda de potencia al sistema de propulsión según los parámetros que se establezcan, lo que conlleva a una mejora del sistema completo y a alargar la vida útil del mismo.

- El convertidor DC/DC BEV4 ha demostrado cumplir con las especificaciones de funcionamiento, sin embargo, es propenso a fallos y como se explicó en el capítulo 3, ya muestra signos de defectos en la regulación para la corriente de salida.

Teniendo en cuenta que el convertidor actual del Melex es el segundo de ese tipo que se integra debido al mal funcionamiento del anterior y que ya no se fabrica ese modelo, una línea de trabajo nueva podría ser estudiar la posibilidad de integrar otro convertidor DC/DC con mayor robustez.

Para ello, lo ideal sería que el nuevo convertidor se pudiera controlar mediante referencias en voltaje, como actualmente se hace, para que no sea necesario modificar excesivamente la electrónica embarcada en la caja de control.

- Como se ha observado tras realizar las pruebas de carga mostradas en el capítulo 6, si bien la pila de combustible es capaz de cargar las baterías, lo hace tan lentamente que no resulta efectivo, más aún teniendo en cuenta que el uso habitual del vehículo no sobrepasa los 10 minutos en movimiento.

Una posibilidad de investigación futura podría ser llevar a cabo un análisis de la viabilidad con distintas tecnologías de baterías para conocer las que aprovechen mejor las características del sistema basado en hidrógeno presente en el Melex.

- Por último, sería muy provechoso para tener una mejor comprensión del sistema, realizar la integración de distintos sensores en el circuito de potencia que permitan conocer realmente el estado de carga de las baterías o la distribución de corriente hacia las baterías y la carga (motor y electrónica embarcada).

ANEXOS

A1 Manual de Usuario



MANUAL DE USO MELEX

Sistema de propulsión híbrido con pila de combustible

INSTITUTO NACIONAL DE TÉCNICA AEROSPACIAL
LABORATORIO DE ENERGÍA - CEDEA



Carlos Naz García

Índice

1- Descripción general	1
2- Precauciones	4
2.1 Precauciones generales.....	4
2.2 Precauciones eléctricas.....	4
2.3 Precauciones con el software	4
3- Activación del sistema	4
3.1 Procedimiento de puesta en marcha	4
3.2 Apagado controlado	5
4- Modos de operación.....	6
4.1 Modo Automático	6
4.2 Modo Test	7
5- Descripción del SCADA.....	8
5.1 Pantalla Principal.....	8
5.2 Pantalla Inicio	9
5.2 Pantalla PEMFC	10
5.3 Pantalla Tanque H2	11
5.4 Pantalla DC/DC	12
5.5 Pantalla Error.....	13
5.6 Pantalla Test	14
6- Esquemas eléctricos	15
6.1 Diagrama de conexionado de la caja de control.....	15
6.2 Esquema de situación de los componentes del Melex	16
7- Solución de problemas.....	17
7.1 La pila de hidrógeno no se pone en marcha.....	17
7.2 Un convertidor DC/DC de la caja de control no funciona	17
7.3 BIOS del PC en pantalla	17

1- Descripción general

El presente manual expone el modo de operación del sistema de control y supervisión del sistema de propulsión híbrido con pila de combustible del Melex. Además, se hace una descripción del sistema en su conjunto.

El sistema consta de un depósito de hidrógeno, una válvula solenoide, un sensor de temperatura, varios sensores de presión, una pila tipo PEM, un convertidor elevador, una caja de control que contiene toda la electrónica de control, un interruptor de encendido y una pantalla táctil. A continuación, se muestra un esquema de situación y varias imágenes de los distintos elementos:



En la imagen se muestra la PEMFC junto con la electrónica de potencia (relé de carga y diodo de potencia montado en disipador de calor) [1], el sistema de reducción de presión junto con el sensor de baja presión [2] y el tanque de almacenamiento de hidrógeno [3], donde se encuentra el sensor de temperatura y de alta presión

Situación del convertidor junto con diodo de potencia para protección montado en disipador de calor.

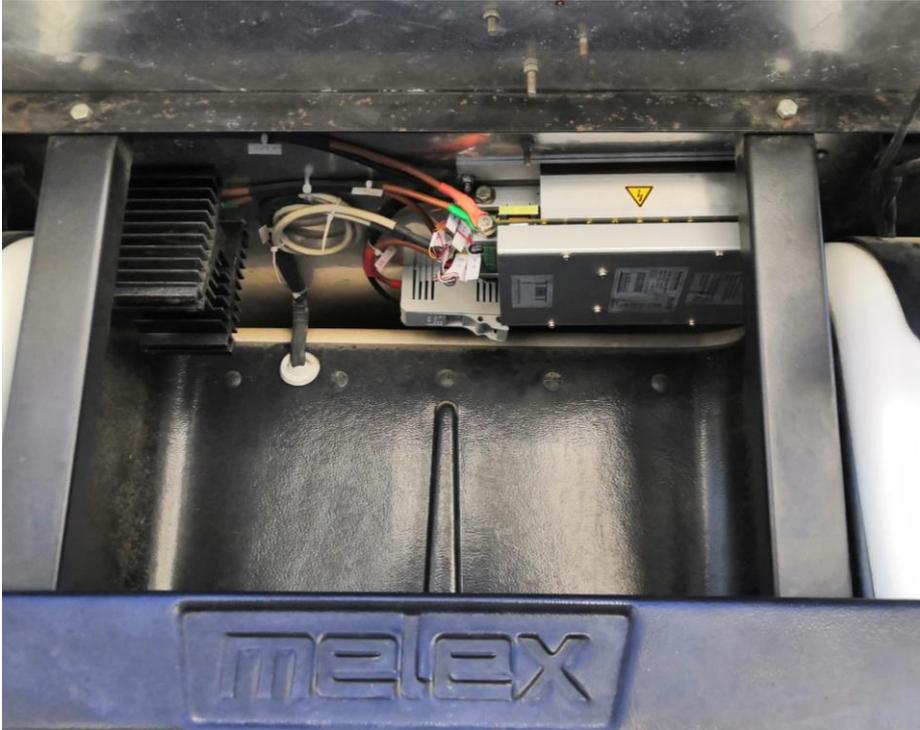
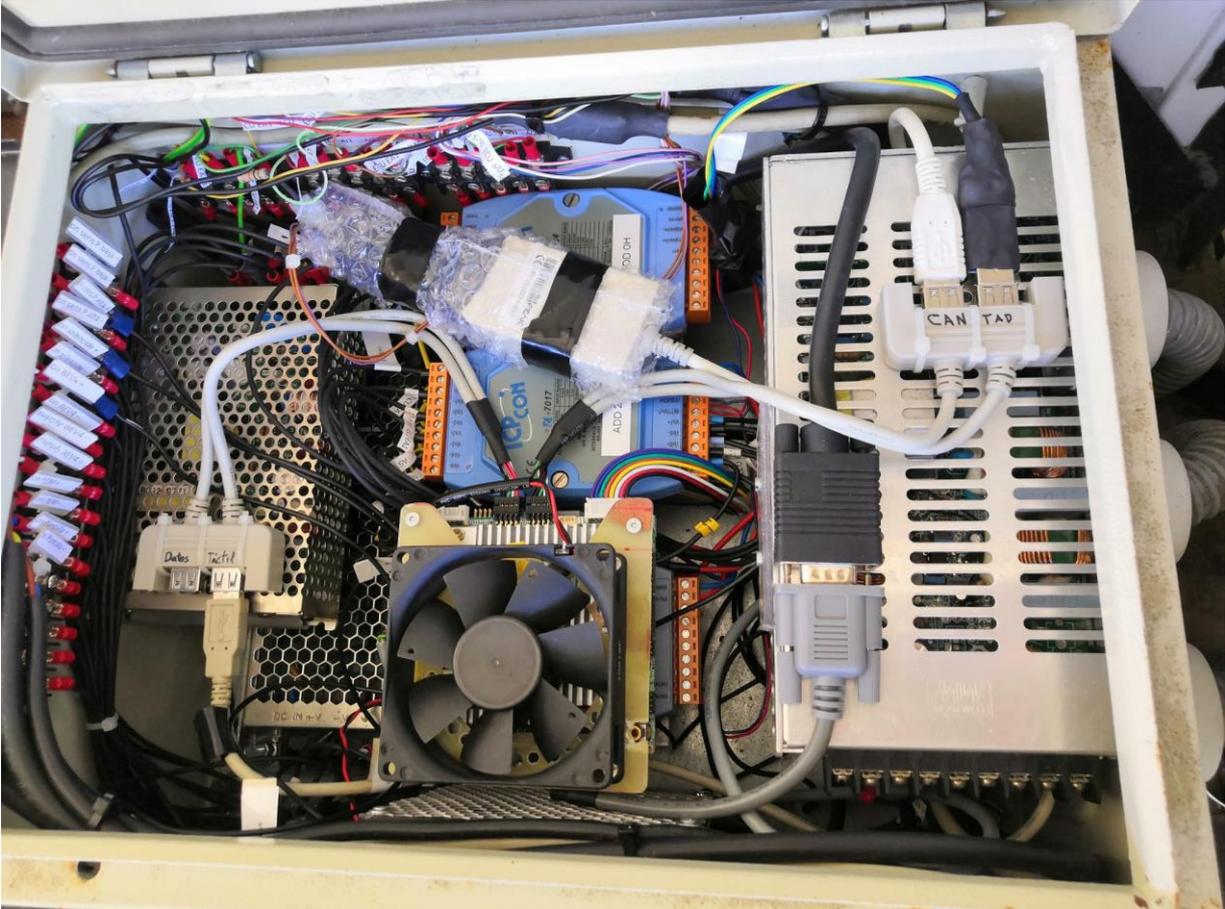


Foto del interior de la caja de control



En la siguiente tabla se muestran los elementos que componen el sistema de propulsión híbrido:

Elemento		Valores	Notas
Depósito H2	Bobina de la solenoide PWM (Dynetek)	12Vdc 0,5-5 seg / PWM 10KHz con 2±0,2A; 0,9±0,1A dc / PWM 10KHz 0,9±0,1A;	34 litros / 35 MPa a 15°C Opciones para abrir la solenoide; Opciones para mantener la solenoide abierta;
	Sensor de temperatura (Dynetek)	-55°C a 130°C / 963000Ω a 300,9Ω	Para ver correspondencias de °C a Ω ver tablas del fabricante.
	Sensor de Presión de hidrógeno (alta) (AST2000)	Excitación 5Vdc; Output 0,5-4,5V; 448Bar; consumo de corriente <10mA	
Sensor de Presión de hidrógeno (baja) (GS4200)		Excitación 13-30Vdc; Output 0-5Vdc; 0-16Bar;	
PEMFC Nexa 1200	PEMFC	Alimentación auxiliar: 110W;12-36Vdc; Output: 20-36Vdc; 65A; 1200W a 5°C-25°C; 1000W a 25°C- 35°C;	Tensión auxiliar mínima del sistema 24Vdc (24-36Vdc). Para más información acudir al manual del fabricante.
	Electroválvula	24Vdc; 0,4A;	
	Relé de carga	24Vdc; <6W;	
	Diodo	Tensión inversa 200V; Intensidad máxima 70A;	
Convertidor (Brandner BEV4)	Convertidor	Alimentación auxiliar: 12Vdc±15%; 1A(2Apeak); Señal de referencia del nivel de alimentación: 0-10Vdc Input: 4KW; 20-80Vdc; 80A; Output: input voltage-100Vdc; 0-65A; Señales analógicas de control y medida: 0-10Vdc	Para más información acudir al manual del fabricante.
	Diodo Bypass	Tensión inversa 200V; Intensidad máxima 70A;	
	Fusibles	Entrada 80A; Salida 50A;	
Caja de control	Conv. DC/DC 48V/24V	Input: 48Vdc (36-72Vdc) Output: 24Vdc; 8,4A; 201,6W;	Para más información acudir al manual del fabricante.
	Conv. DC/DC 48V/12V	Input: 48Vdc (28,8-67,2Vdc) Output: 12Vdc; 25A; 300W;	
	Conv. DC/DC 48V/5V	Input: 48Vdc Output: 5Vdc; 50W;	
	Fusibles	Situados en la entrada y en cada salida de los DC/DC.	
	Fichas de empalme	De 12V y 5V	
	Ventiladores x2	Alimentación: 12V	
	PC 104 Control y Supervisión	PCM-3365	
	Hub USB x2		
	Tarjetas de adquisición de datos (TADs) Fabricante → ICP DAS	i-7017 → Entradas analógicas [0...10V] i-7024 → Salidas analógicas [0...10V] i-7520 → Conversión protocolo de comunicación [RS485 a RS232]	
PCANView	Adaptador CAN a USB		

2- Precauciones

Además de las precauciones concretas del sistema de control y supervisión de la PEMFC dadas en este manual, durante el tiempo de operación se respetarán en todo momento las precauciones dadas en cualquier otro manual de los distintos sistemas que forman el vehículo.

2.1 Precauciones generales

Debido a la existencia de productos inflamables, evitar situaciones que puedan provocar riesgo de incendio o explosión.

2.2 Precauciones eléctricas

- Para realizar cualquier tipo de operación eléctrica el pulsador de emergencia debe estar en la posición de paro de emergencia. Además, si la operación se va a realizar en el circuito de fuerza (PEMFC-Convertidor- Baterías) retirar los fusibles de protección situados aguas arriba y aguas abajo del convertidor.
- Para realizar la puesta en marcha del sistema la caja de control debe estar cerrada.
- Evitar romper el aislamiento existente entre el sistema de control y supervisión de la PEMFC y el resto de sistemas del vehículo.

2.3 Precauciones con el software

- No utilizar el modo de operación manual sin haber leído previamente el presente manual.
- No realizar cambios en el software si no es personal cualificado.

3- Activación del sistema

En este punto se describe el procedimiento a seguir para la puesta en marcha y apagado del sistema de control y supervisión de la PEMFC.

3.1 Procedimiento de puesta en marcha

1. Girar pulsador de emergencia (A en la figura), en el sentido indicado.
2. Introducir llave de contacto.
3. Girar la llave hasta que se activen el velocímetro (C) y el indicador de carga de las baterías (D).
4. Activar el interruptor de encendido del sistema de hidrógeno (B).
5. El sistema de hidrógeno habrá entrado en proceso de activación. Esto significa que tanto la PEMFC, como el convertidor, la pantalla y el ordenador de a bordo son alimentados.

Una vez se inicia el ordenador de a bordo, se ejecuta automáticamente el software de control y supervisión implementado, comenzado a ejecutarse en Modo Automático.

Los modos de funcionamiento se detallan en el siguiente apartado.



3.2 Apagado controlado

Existen 2 formas de finalizar la utilización del sistema híbrido de propulsión.

En caso de querer dar por terminado por completo el uso del sistema de hidrógeno:

1. Pulsar el botón *Stop* ubicado en la pantalla *Principal* de la interfaz.
2. El algoritmo guarda los datos hasta el momento y apaga el ordenador de a bordo.
3. Una vez que la pantalla no muestre imagen, desactivar el interruptor de activación del sistema de hidrógeno (B).
4. Con el sistema de hidrógeno ya sin alimentación, girar la llave de contacto para desconectar las baterías.
5. Cerrar la llave de paso del sistema de alimentación de hidrógeno situada en la parte trasera del vehículo para evitar posibles fugas.

En caso de querer parar el sistema de propulsión sin apagar el ordenador de a bordo. Esta forma debe ser la utilizada para acceder a la configuración del ordenador de a bordo o para la recopilación de los datos almacenados durante el uso del sistema de propulsión.

1. Pulsar el botón *Datos* ubicado en la pantalla *Inicio* de la interfaz.
2. El algoritmo guarda los datos hasta el momento y envía la señal de paro a la PEMFC para que deje de generar potencia.
3. Se termina la ejecución del algoritmo de control y supervisión y se muestra en pantalla el escritorio del ordenador.
4. En este punto se podría acceder a la configuración de Windows o a los datos guardados.
5. En caso de querer recoger los datos:
 - a. Insertar una memoria externa en el puerto USB libre en el interior de la caja de control marcado como *DATOS*.
 - b. En la carpeta del escritorio *Datos* se encuentran los archivos .txt que contienen la información generada. El formato para saber el archivo deseado se reconocer por

el formato del nombre de guardado atendiendo a la fecha y hora en que se ha hecho uso del vehículo.

- c. Copiar el archivo a la memoria externa y extraer de manera segura.
6. Si se quiere reactivar el sistema de propulsión, ejecutar el .exe situado en el escritorio del ordenador *MELEX_C&S*. Al abrirse se inicia según lo explicado en el apartado 3.1.
7. Si se quiere detener el uso del vehículo, ejecutar el .exe en el escritorio *Shutdown*. Esto apagará el ordenador de a bordo y a partir de aquí seguir las instrucciones del apagado controlado anterior.

Existe otra manera de terminar la ejecución del sistema de propulsión que se desaconseja utilizar de manera habitual y sólo para casos de emergencia.

1. Pulsar la seta de emergencia (A) o girar la llave de contacto.
2. Cerrar la llave de paso del sistema de alimentación de hidrógeno situada en la parte trasera del vehículo para evitar posibles fugas.

4-Modos de operación

Se describen los modos de operación del sistema de control y supervisión del sistema de propulsión híbrido.

En cualquiera de los modos de funcionamiento el usuario puede hacer uso de los botones de reset de las comunicaciones (en pantalla *Error*) por si hiciera falta solucionar algún fallo leve. Además, el botón *STOP* de la pantalla *Inicio*, también es independiente del modo de operación que se esté ejecutando, pudiendo así detener la generación de potencia en cualquier momento durante el uso del vehículo.

4.1 Modo Automático

Por defecto el sistema siempre se iniciará en modo automático. Este modo está diseñado para que el sistema trabaje en el punto óptimo de funcionamiento de la PEMFC.

Descripción del modo automático:

1. Activación del sistema.
2. Una vez haya finalizado el proceso de activación, comienza el proceso de
3. control y supervisión de la demanda de potencia a la PEMFC.
4. En base a la información obtenida tras la caracterización de la PEMFC, el control implementado irá aumentando el nivel de potencia demandado a la entrada del convertidor hasta alcanzar el punto óptimo de funcionamiento de la pila.
 - Nivel 1: 200W
 - Nivel 2: 400W
 - Nivel 3: 700W
5. Una vez alcanzado el nivel 3, la potencia se mantiene constante hasta que el usuario decida operar en modo *Test* (manual), se activen alguna de las señales de mal funcionamiento del sistema (Bypass del convertidor o error grave de la pila) o se alcance un SOC de baterías alto, en cuyo caso se detiene la generación de potencia por parte de la pila.

6. Durante el uso en modo automático, se pueden cambiar los límites de tensión superior e inferior en los que se considera que el sistema debe estar generando potencia. Estos controles se encuentran en la pantalla *Test*.

4.2 Modo Test

Este modo está diseñado para que el usuario pueda realizar ensayos. Descripción del modo manual:

1. Activación del sistema.
2. Una vez haya finalizado el proceso de activación, pulsar en la pestaña inicio y a continuación pulsar el botón AUTO/TEST.
3. Una vez el sistema se encuentre en modo manual, la demanda de potencia será establecida por el usuario, para ello deberá introducir el valor deseado y posteriormente pulsar el botón *SOLICITAR W* para que la demanda de potencia se haga efectiva.
4. En este modo, se puede también ejercer el control sobre la PEMFC. Mediante los comandos *Start*, *Reset* y *Stop* ubicados en la pantalla *Test* se puede poner en marcha, resetear o detener el funcionamiento de la pila de combustible.

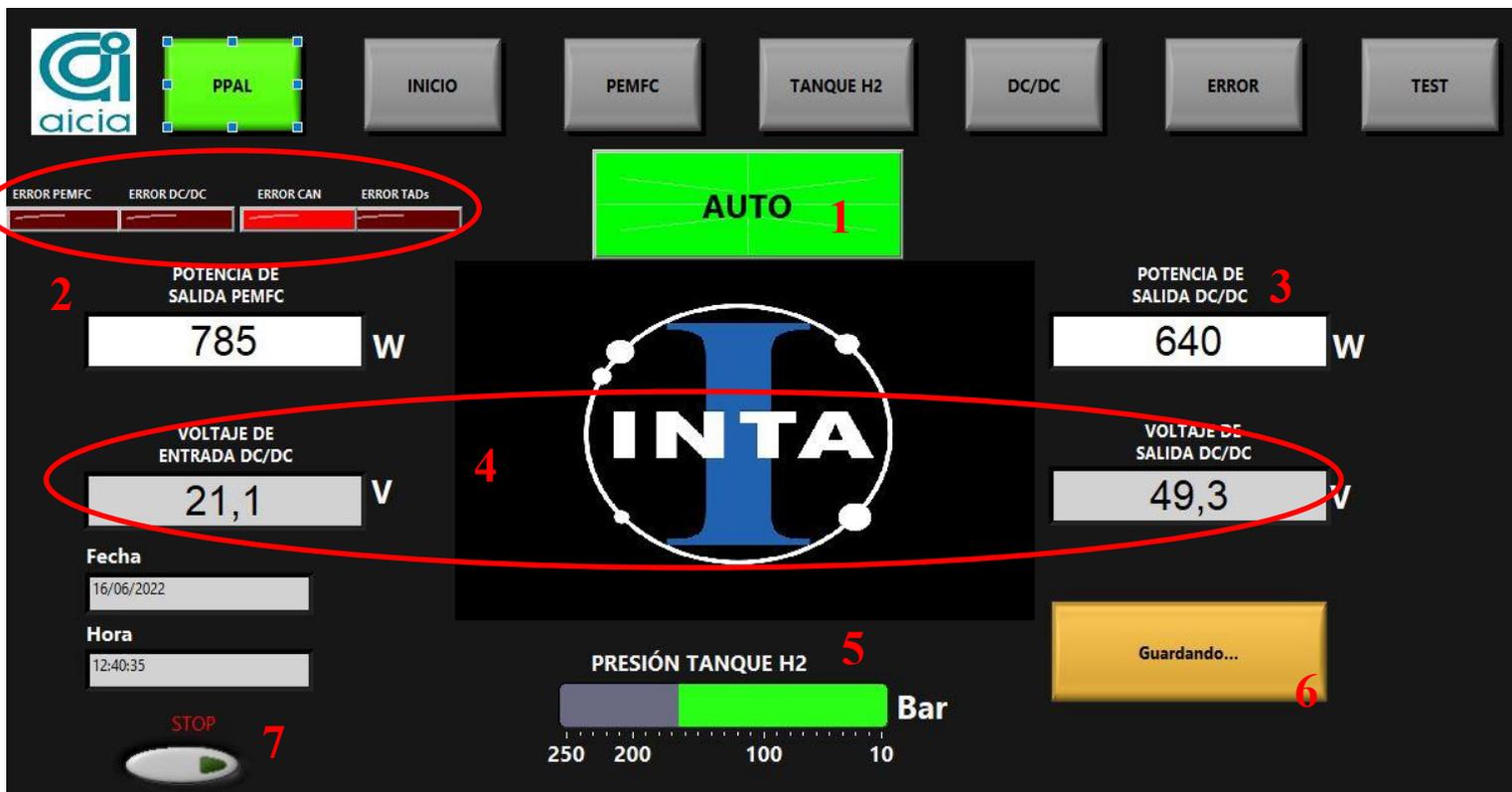
5-Descripción del SCADA

5.1 Pantalla Principal

En esta pantalla se muestra la información más relevante durante el funcionamiento del sistema de propulsión a base de hidrógeno.

Aparte de la botonera de navegación entre pantallas en la parte superior, la información que se es la siguiente:

Información	Posición en la pantalla
Modo de operación	1
Señales de errores generales	2
Potencia de PEMFC y hacia baterías	3
Voltajes de E/S el convertidor	4
Presión en el depósito de H_2	5
Guardado de datos	6
Botón <i>Stop</i> para fin de ejecución	7



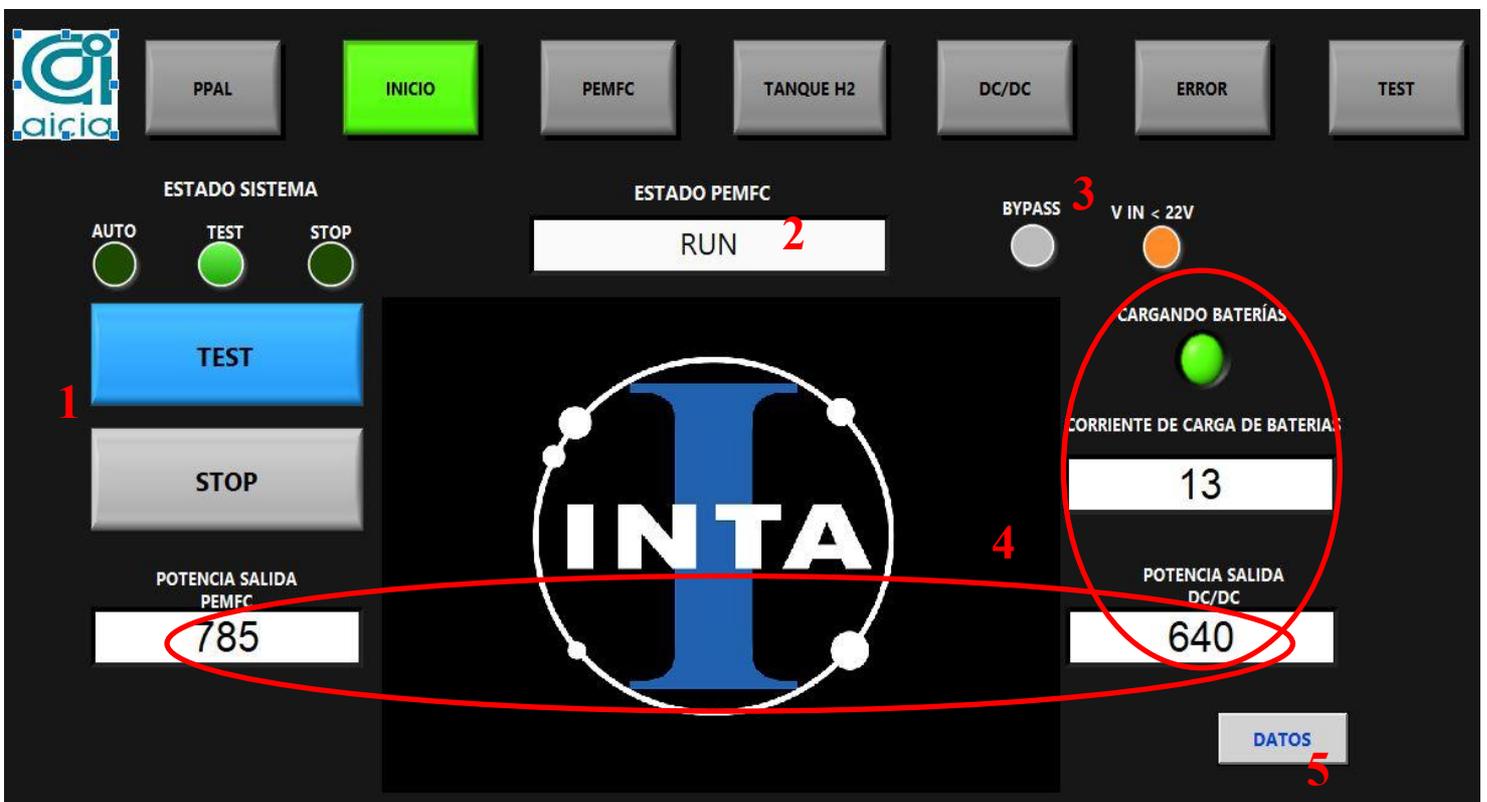
5.2 Pantalla Inicio

En esta pantalla se ofrecen al usuario los botones para cambiar entre modos de operación además del estado de funcionamiento de la pila, información sobre el estado el convertidor y datos sobre los flujos de energía. También se encuentra el botón para finalizar la ejecución del sistema de propulsión para acceder a los datos almacenados.

En la siguiente tabla se especifica junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Botones para modo de operación y estado del sistema	1
Estado de la PEMFC	2
Información sobre el convertidor	3
Flujo de energía (potencias, corriente y carga de baterías)	4
Botón <i>Datos</i> para fin parcial de ejecución	5

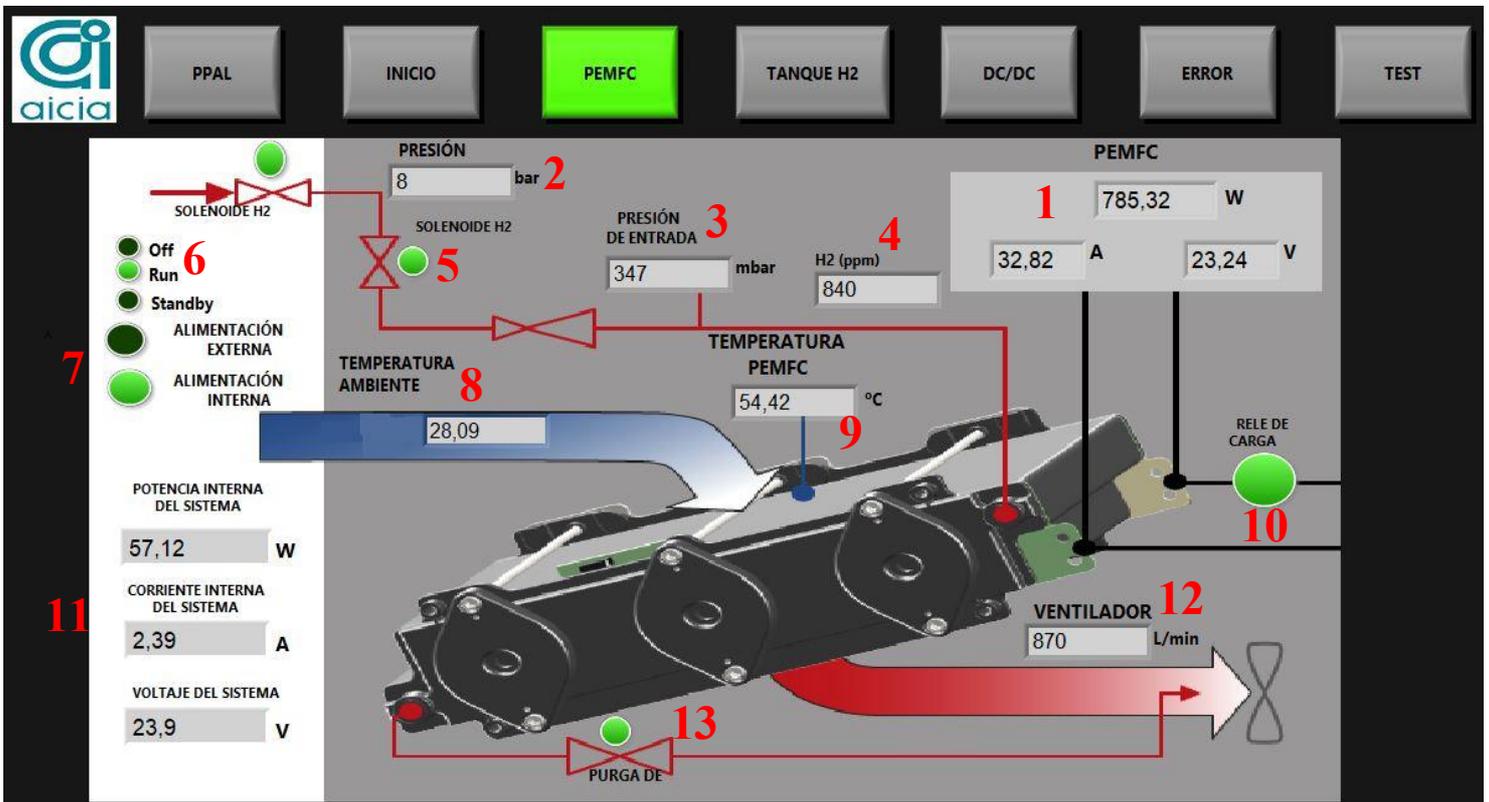
En esta pantalla se muestra al usuario toda la información relativa a la pila de combustible. En la siguiente tabla se especifica junto con su ubicación en la pantalla.



5.3 Pantalla PEMFC

En esta pantalla se muestra al usuario toda la información relativa a la pila de combustible. En la siguiente tabla se especifica junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Potencia, tensión y corriente de salida	1
Presión de entrada	2
Presión de operación	3
Concentración de H_2	4
Operación de válvulas	5
Estado de PEMFC	6
Fuente de alimentación	7
Temperatura ambiente	8
Temperatura interna	9
Operación del relé de carga	10
Potencia, tensión y corriente propias del sistema	11
Velocidad del ventilador	12
Activación de purga	13



5.4 Pantalla Tanque H2

En esta pantalla se muestra al usuario la información concerniente a los sensores integrados en el sistema de almacenamiento y distribución del hidrógeno. En la siguiente tabla se detalla junto con su ubicación en la pantalla.

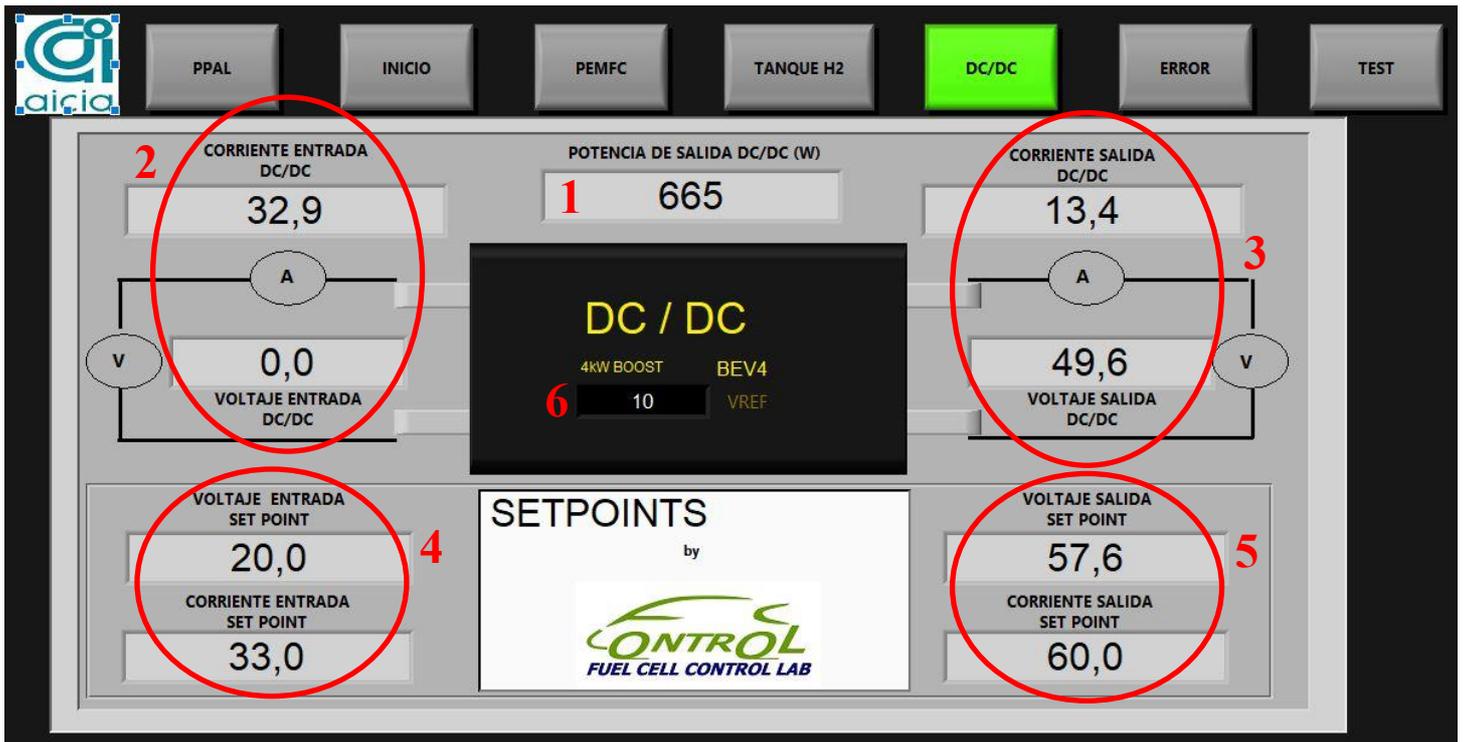
Información	Posición en la pantalla
Evolución de la presión en el depósito de H_2	1
Presión de entrada a la FC	2
Temperatura interna del depósito de H_2	3
Presión actual en el depósito de H_2	4



5.5 Pantalla DC/DC

En esta pantalla se muestra al usuario la información proveniente del convertidor DC/DC. En la siguiente tabla se detalla junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Potencia de salida	1
Corriente y tensión a la entrada	2
Corriente y tensión a la salida	3
Set point de tensión y corriente de entrada	4
Set point de tensión y corriente de salida	5
Voltaje de referencia del convertidor	6

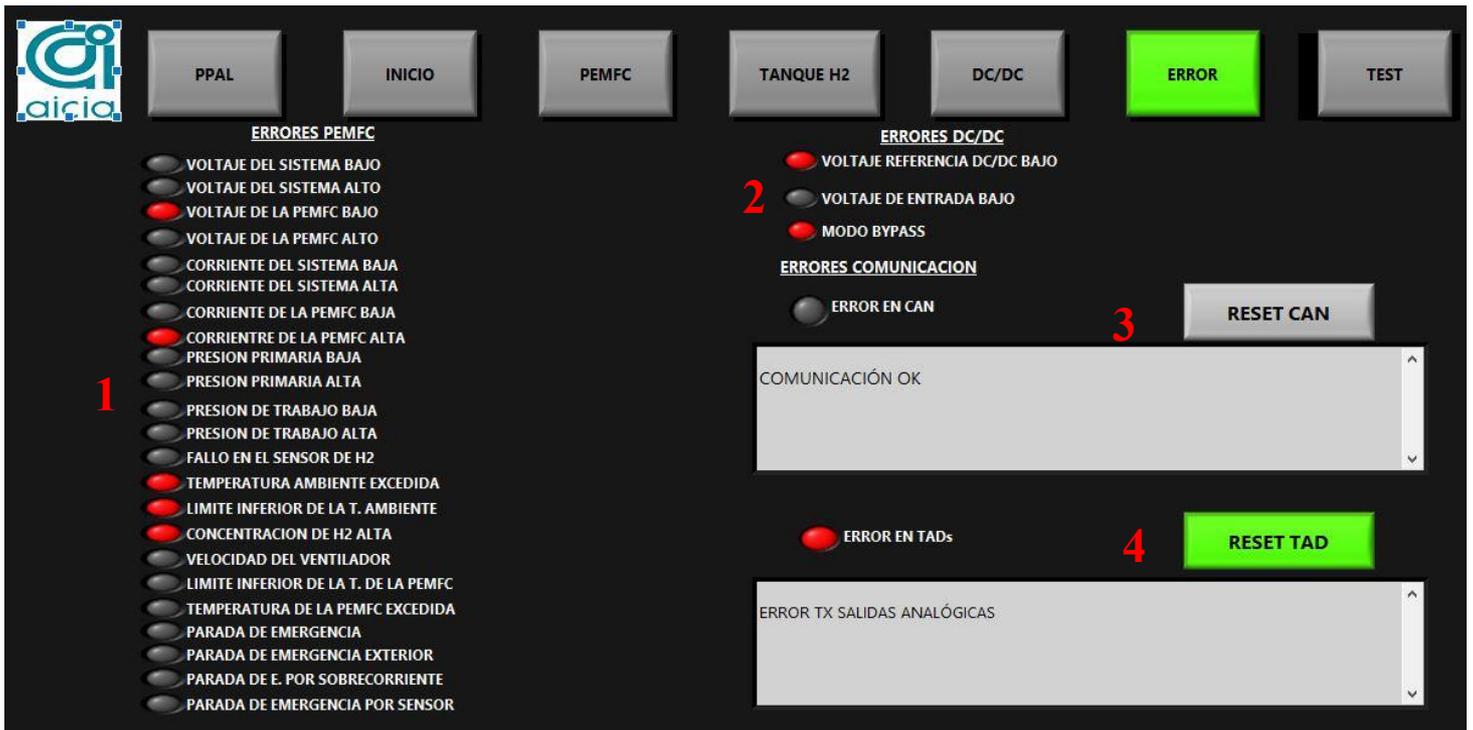


5.6 Pantalla Error

En esta pantalla se muestra al usuario la información relativa a los errores. Estos pueden provenir de la pila de combustible, la información del convertidor o la comunicación mediante CAN o puerto serie. Además, se encuentran en esta pantalla los botones para resetear las comunicaciones.

En la siguiente tabla se especifica la información mostrada junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Errores provenientes de la PEMFC	1
Errores de funcionamiento del convertidor	2
Comunicación CAN. Errores y Reset	3
Ccomunicación Serie. Errores y Reset	4

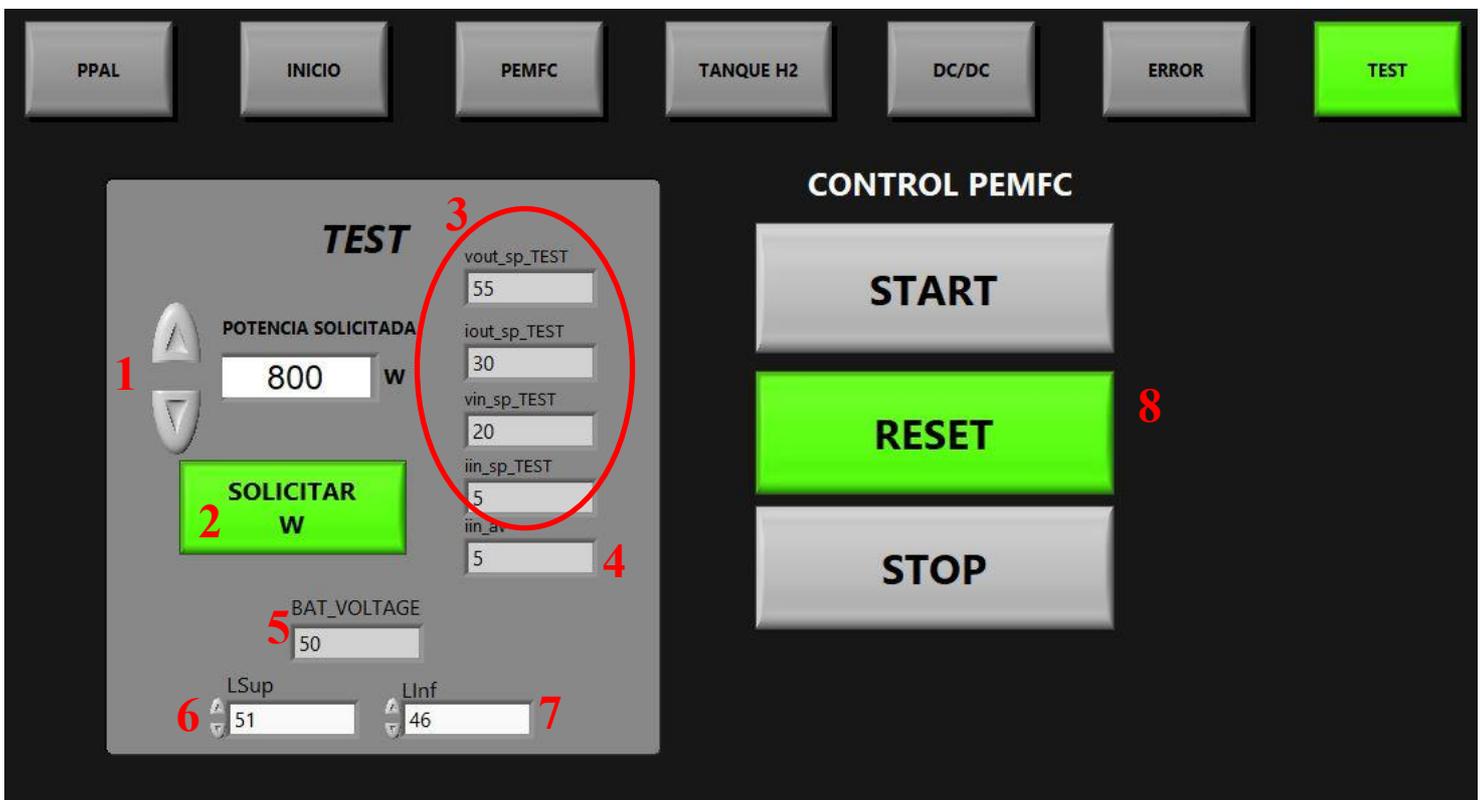


5.7 Pantalla Test

En esta pantalla se ofrece al usuario los controles para la demanda de potencia y el control de la PEMFC. Así mismo, se muestra información de los setpoints calculados en base a la potencia solicitada y la tensión de baterías. Además, se encuentran en esta pantalla los botones para fijar los límites del rango de carga para el modo de operación automático.

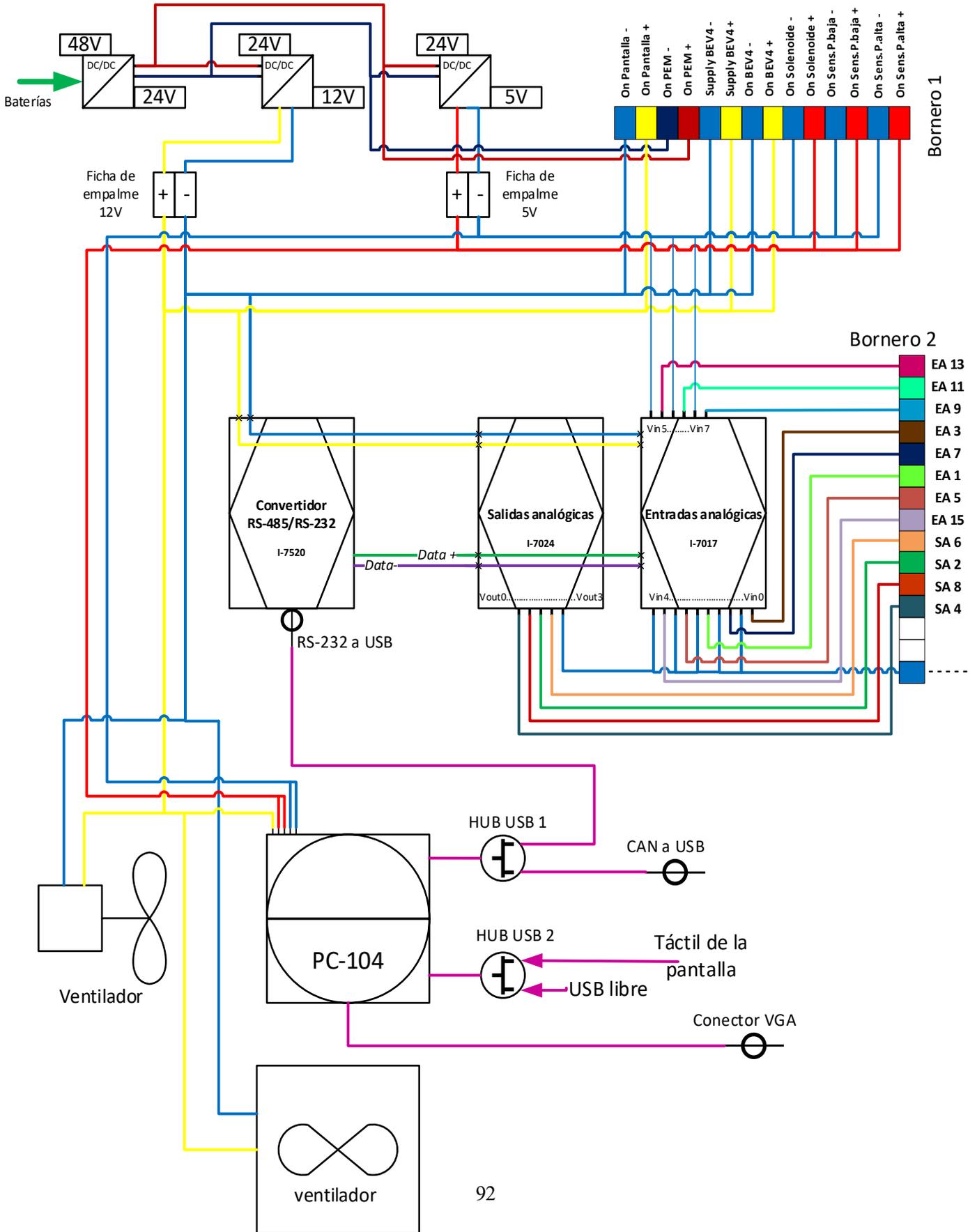
En la siguiente tabla se especifica la información expuesta junto con su ubicación en la pantalla.

Información	Posición en la pantalla
Selector de potencia a la entrada del convertidor	1
Botón para solicitar la potencia seleccionada	2
Setpoints de tensión e intensidad para el convertidor	3
Intensidad medida a la entrada del convertidor	4
Tensión de baterías	5
Límite de tensión superior para carga de baterías en modo Auto	6
Límite de tensión inferior para carga de baterías en modo Auto	7
Controles manuales para la PEMFC	8



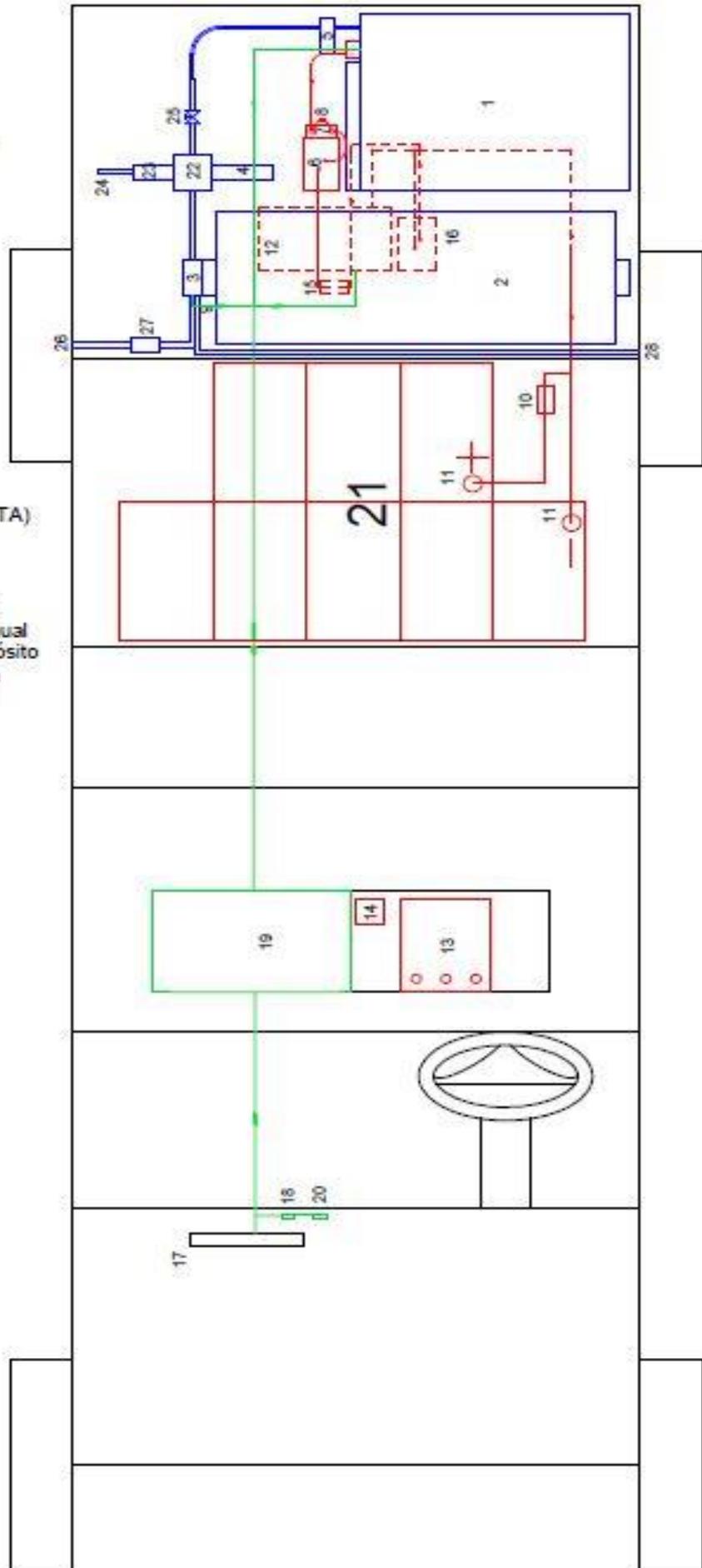
6- Esquemas eléctricos

6.1 Diagrama de conexionado de la caja de control



6.2 Esquema de situación de los componentes del Melex

- 1 - PEMFC (NEXA1200)
- 2 - Deposito
- 3 - Válvula Dynetek
- 4 - Válvula GENSPEC GS4200
- 5 - Electroválvula NEXA1200
- 6 - Diodo
- 7 - Relé
- 8 - Resistencia de precarga
- 9 - AST2000
- 10 - Fusible 50A
- 11- BUS (bomes)
- 12- Convertidor BEV4
- 13- Controlador SEPEX
- 14- Contactor
- 15- Fusible 80A
- 16- Diodo Bypass
- 17- Pantalla
- 18- Interruptor ON/OFF
- 19- Caja de Control
- 20- Pulsador de emergencia(SETA)
- 21- Banco de Baterías
- 22- Manorreductor alta presión
- 23- Válvula de seguridad
- 24- Línea de purga baja presión
- 25- Válvula de alimentación manual
- 26- Conector de llenado del depósito
- 27- Manómetro presión de carga
- 28- Línea de purga alta presión



7- Solución de problemas

7.1 La pila de hidrógeno no se pone en marcha

Pueden ser varios los motivos por lo que la PEMFC no se pone en marcha, para acotar la avería seguir los pasos que se indican:

1. ¿Se enciende alguna luz en la PEMFC?
2. No: Abrir la caja de control y comprobar que la tensión en el bornero1 (señal “On PEM”) es de 24V. En caso de que la tensión no sea de 24V es posible que la fuente de 24V no estén funcionando correctamente. **PRECAUCIÓN al abrir y manipular la caja, hay elementos y conductores activos con tensión.**
3. Sí: Mirar en la pantalla *Inicio* el estado de la PEMFC. En función del estado se actuará.
4. ¿Se encuentra en error?
5. Sí: Mirar en la pantalla *Error* si hay algún luminoso encendido, en caso afirmativo la avería se encuentra localizada. Revisar el manual de la pila.

A continuación, como ejemplo se detallan algunas causas comunes que pueden provocar el mal funcionamiento de la PEMFC:

1. La llave de paso manual de hidrógeno está cerrada.
2. El depósito está vacío.
3. La electroválvula del sistema por algún motivo no se ha abierto.
4. La electroválvula propia de la PEMFC por algún motivo no se ha abierto.
5. El convertidor DC/DC por algún motivo no es capaz de suministrar la potencia necesaria en el arranque.

7.2 Un convertidor DC/DC de la caja de control no funciona

Pueden ser varios los motivos por lo que el convertidor DC/DC no funcione. Para acotar la avería seguir los pasos que se indican:

1. ¿Los demás DC/DC funcionan correctamente?
2. No: Comprobar el fusible común de entrada a los DC/DC (situado cerca del DC/DC de 48V/12V) probablemente esté fundido.
3. Sí: Comprobar el fusible de salida del DC/DC en cuestión. Probablemente esté fundido. Si los fusibles se encuentran en buen estado es probable que el DC/DC en cuestión esté averiado.

7.3 BIOS del PC en pantalla

Puede deberse a que la pila (CR2032V) encargada de mantener la configuración de la BIOS se ha agotado. Cambiar la pila y pulsar F1 para continuar con el inicio de sesión normal.

A2 Comandos de configuración de TADs

\$00M => GET_MODULE_NAME
\$00F => GET_MODULE_FIRMWARE
\$002 => GET_MODULE_CONFIG
%0001300600 => SET_MODULE_CONFIG
#000+00.001 => OUTPUT_CH0_AO
\$0080 => READ_CH0_AO
#001+00.001 => OUTPUT_CH1_AO
\$0081 => READ_CH1_AO
#002+00.001 => OUTPUT_CH2_AO
\$0082 => READ_CH2_AO
#003+00.001 => OUTPUT_CH3_AO
\$0083 => READ_CH3_AO
\$00P1 => SET_MODULE_PROTOCOL
\$00P => GET_MODULE_PROTOCOL
\$0040 => SET_CH0_AO_POWERON
\$0070 => GET_CH0_AO_POWERON
\$0041 => SET_CH1_AO_POWERON
\$0071 => GET_CH1_AO_POWERON
\$0042 => SET_CH2_AO_POWERON
\$0072 => GET_CH2_AO_POWERON
\$0043 => SET_CH3_AO_POWERON
\$0073 => GET_CH3_AO_POWERON
~0050 => SET_CH0_AO_SAFE_VALUE
~0040 => GET_CH0_AO_SAFE_VALUE
~0051 => SET_CH1_AO_SAFE_VALUE
~0041 => GET_CH1_AO_SAFE_VALUE
~0052 => SET_CH2_AO_SAFE_VALUE
~0042 => GET_CH2_AO_SAFE_VALUE
~0053 => SET_CH3_AO_SAFE_VALUE
~0043 => GET_CH3_AO_SAFE_VALUE
\$0060 => READ_CH0_LAST_AO
\$0061 => READ_CH1_LAST_AO
\$0062 => READ_CH2_LAST_AO
\$0063 => READ_CH3_LAST_AO
~002 => GET_WDT_STATUS_TIMER

~0030FA => SET_WDT_STATUS_TIMER
~000 => READ_WDT_STATUS
~001 => CLEAR_WDT_FLAG
~** => HOST_OK
~002 => GET_WDT_STATUS_TIMER
~0030FA => SET_WDT_STATUS_TIMER
~000 => READ_WDT_STATUS
~001 => CLEAR_WDT_FLAG
~** => HOST_OK
~002 => GET_WDT_STATUS_TIMER
~0030FA => SET_WDT_STATUS_TIMER
~000 => READ_WDT_STATUS
~001 => CLEAR_WDT_FLAG
~** => HOST_OK
~002 => GET_WDT_STATUS_TIMER
~0030FA => SET_WDT_STATUS_TIMER
~000 => READ_WDT_STATUS
~001 => CLEAR_WDT_FLAG
~** => HOST_OK
~002 => GET_WDT_STATUS_TIMER
~0030FA => SET_WDT_STATUS_TIMER
~000 => READ_WDT_STATUS
~001 => CLEAR_WDT_FLAG
~** => HOST_OK

A4 Código VBA en Excel

Código para la importación y procesamiento de la información guardada durante el uso del vehículo con el sistema de propulsión de hidrógeno.

```
Sub Import_Data()  
    Application.Calculation = xlCalculationManual  
    Application.EnableEvents = False  
    Application.ScreenUpdating = False  
    Dim h As Worksheet  
    Dim nfil As Long  
    Dim ini As Range  
    Dim LibroDestino, LibroOrigen As Workbook  
    Dim CeldaDestino As Range  
    Dim RetVal As Boolean  
    Set LibroDestino = ActiveWorkbook  
    Set CeldaDestino = Range("A6")  
  
    RetVal = Application.Dialogs(xlDialogOpen).Show(".txt")  
    If RetVal = False Then Exit Sub  
    Set LibroOrigen = ActiveWorkbook  
    Range(Range("A1"), Range("A1").SpecialCells(xlLastCell)).Copy  
    LibroDestino.Activate  
    CeldaDestino.PasteSpecial Paste:=xlValues  
    LibroOrigen.Close False  
  
    Columns("A:A").Select  
    Selection.NumberFormat = "[$-F400]h:mm:ss AM/PM"  
  
    Rows("11:11").Select  
    Selection.Columns.AutoFit  
  
    Set h = Hoja1  
    Set ini = Range("A13")  
  
    Range("H4").Value = 100  
    Range("I4").Value = 10  
  
    nfil = h.Cells(h.Rows.Count, ini.Column).End(xlUp).Row
```

```
Range("H4").Select
Selection.Copy
h.Range("D13", h.Cells(nfil, "E")).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlDivide, _
SkipBlanks:=True, Transpose:=False
```

```
Range("H4").Select
Selection.Copy
h.Range("H13", h.Cells(nfil, "I")).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlDivide, _
SkipBlanks:=True, Transpose:=False
```

```
Range("H4").Select
Selection.Copy
h.Range("M13", h.Cells(nfil, "M")).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlDivide, _
SkipBlanks:=True, Transpose:=False
```

```
Range("H4").Select
Selection.Copy
h.Range("S13", h.Cells(nfil, "V")).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlDivide, _
SkipBlanks:=True, Transpose:=False
```

```
Range("I4").Select
Selection.Copy
h.Range("Y13", h.Cells(nfil, "Z")).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlDivide, _
SkipBlanks:=True, Transpose:=False
```

```
Range("H4").Select
Selection.Copy
h.Range("AA13", h.Cells(nfil, "AA")).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlDivide, _
SkipBlanks:=True, Transpose:=False
```

```
Range("H4").Select
```

```
Selection.Copy
h.Range("AE13", h.Cells(nfil, "AE")).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlDivide, _
    SkipBlanks:=True, Transpose:=False
' Quitar ceros de FC_POWER
Set r = Range(Range("N14"), Range("N14").End(xlDown))
Set h = Hoja1
Set ini = Range("A13")
r.Select
nfil = h.Cells(h.Rows.Count, ini.Column).End(xlUp).Row
x = 13
Do
    r.Find(What:="0", After:=ActiveCell, LookIn:=xlValues, _
        LookAt:=xlWhole, SearchOrder:=xlByColumns, _
        MatchCase:=False, SearchFormat:=False).Activate
    x = x + 1
    Fila_0 = ActiveCell.Row
    Col = ActiveCell.Column
    Fila_Val = Fila_0 - 1
    ActiveCell.Value = Cells(Fila_Val, Col).Value
Loop While x <= nfil
'-----
Range("H4").Value = ""
Range("I4").Value = ""
Application.CutCopyMode = False
Range("A1").Select
Application.EnableEvents = True
Application.ScreenUpdating = True
Application.Calculation = xlCalculationAutomatic

End Sub
```

Código para generación de gráficas de la información guardada durante el uso del vehículo con el sistema de propulsión de hidrógeno.

```
Sub Graficas()  
Application.EnableEvents = False  
Application.ScreenUpdating = False  
Dim A As Variant  
Dim x  
Dim n As String  
Data = Array("D13", "K13", "E13", "I13", "H13", "V13", "AC13", "N13", "BG13", "C13", "O13")  
Name = Array("Vout Medida", "Iin SetPoint", "Vin Medida", "Iin Medida", "Iout Medida", "Temp FC", "Fan  
Speed", "Pot PEMFC", "Pot Conv In SP", "Pot Conv Out", "Presión Depósito H2")  
  
" Grafica Tensiones y Corrientes "  
  Sheets("Gráficas").Select  
  ActiveSheet.Shapes.AddChart2(332, xlLineMarkers).Select  
  ng = ActiveChart.Name  
  gn = Mid(ng, 10, 30)  
  With ActiveSheet.Shapes(gn)  
    .Left = Range("B1").Left  
    .Top = Range("A3").Top  
    .Width = 850  
    .Height = 450  
  End With  
  
  For x = 0 To 4  
    Sheets("Hoja1").Select  
    StartRange = Data(x)  
    n = Name(x)  
    Set A = Range(StartRange, Range(StartRange).End(xlDown))  
    Sheets("Gráficas").Select  
    ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries  
    ActiveChart.FullSeriesCollection(x + 1).Name = n  
    ActiveChart.FullSeriesCollection(x + 1).Values = A  
  Next  
  ActiveChart.FullSeriesCollection(2).Select  
  With Selection.Format.Line  
    .Visible = msoTrue  
    .DashStyle = msoLineDash
```

```

End With
ActiveChart.ChartTitle.Text = "DATOS"
ActiveChart.ChartStyle = 227
ActiveChart.SetElement (msoElementLegendRight)
ActiveChart.ChartArea.Select
" Grafica Tempereatura PEMFC "
Sheets("Gráficas").Select
ActiveSheet.Shapes.AddChart2(332, xlLineMarkers).Select
ng = ActiveChart.Name
gn = Mid(ng, 10, 30)
With ActiveSheet.Shapes(gn)
.Left = Range("B1").Left
.Top = Range("A37").Top
.Width = 850
.Height = 450
End With

For x = 5 To 5
Sheets("Hoja1").Select
StartRange = Data(x)
n = Name(x)
Set A = Range(StartRange, Range(StartRange).End(xlDown))
Sheets("Gráficas").Select
ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Name = n
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Values = A
Next
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Select
With Selection.Format.Line
.Visible = msoTrue
.ForeColor.RGB = RGB(192, 0, 0)
.Transparency = 0
End With
ActiveChart.SetElement (msoElementLegendRight)
ActiveChart.ChartTitle.Select
ActiveChart.ChartTitle.Text = "Temperatura FC"
ActiveChart.ChartStyle = 227

```

```

ActiveChart.ChartArea.Select
" Grafica Ventilador PEMFC "
Sheets("Gráficas").Select
ActiveSheet.Shapes.AddChart2(332, xlLineMarkers).Select
ng = ActiveChart.Name
gn = Mid(ng, 10, 30)
With ActiveSheet.Shapes(gn)
.Left = Range("Q1").Left
.Top = Range("A37").Top
.Width = 850
.Height = 450
End With
For x = 6 To 6
Sheets("Hoja1").Select
StartRange = Data(x)
n = Name(x)
Set A = Range(StartRange, Range(StartRange).End(xlDown))
Sheets("Gráficas").Select
ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Name = n
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Values = A
Next
ActiveChart.SetElement (msoElementLegendRight)
ActiveChart.ChartTitle.Select
ActiveChart.ChartTitle.Text = "Ventilación FC [L/min] "
ActiveChart.ChartStyle = 227
ActiveChart.ChartArea.Select

" Grafica Potencias "
Sheets("Gráficas").Select
ActiveSheet.Shapes.AddChart2(332, xlLineMarkers).Select
ng = ActiveChart.Name
gn = Mid(ng, 10, 30)
With ActiveSheet.Shapes(gn)
.Left = Range("Q1").Left
.Top = Range("A3").Top
.Width = 850
.Height = 450

```

```

End With
For x = 7 To 9
    y = x - 6
    Sheets("Hoja1").Select
    StartRange = Data(x)
    n = Name(x)
    Set A = Range(StartRange, Range(StartRange).End(xlDown))
    Sheets("Gráficas").Select
    ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
    ActiveChart.FullSeriesCollection(y).Name = n
    ActiveChart.FullSeriesCollection(y).Values = A
Next
ActiveChart.FullSeriesCollection(2).Select
With Selection.Format.Line
    .Visible = msoTrue
    .DashStyle = msoLineDash
End With
ActiveChart.ChartTitle.Text = "Potencias"
ActiveChart.ChartStyle = 227
ActiveChart.SetElement (msoElementLegendRight)
ActiveChart.ChartArea.Select

" Grafica Presion Tanque H2 "
Sheets("Gráficas").Select
ActiveSheet.Shapes.AddChart2(332, xlLineMarkers).Select
ng = ActiveChart.Name
gn = Mid(ng, 10, 30)
With ActiveSheet.Shapes(gn)
    .Left = Range("B1").Left
    .Top = Range("A71").Top
    .Width = 850
    .Height = 450
End With
For x = 10 To 10
    Sheets("Hoja1").Select
    StartRange = Data(x)
    n = Name(x)

```

```
Set A = Range(StartRange, Range(StartRange).End(xlDown))
Sheets("Gráficas").Select
ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Name = n
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Values = A
Next
ActiveChart.FullSeriesCollection(1).Select
With Selection.Format.Line
    .Visible = msoTrue
    .ForeColor.RGB = RGB(0, 192, 0)
    .Transparency = 0
End With
ActiveChart.SetElement (msoElementLegendRight)
ActiveChart.ChartTitle.Select
ActiveChart.ChartTitle.Text = "Prresión Depósito H2"
ActiveChart.ChartStyle = 227
ActiveChart.ChartArea.Select
Application.EnableEvents = True
Application.ScreenUpdating = True

End Sub
```

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

[1 D. Guinea, «Un futuro para el transporte: sol, hidrógeno..., pila de combustible,» *La Fundación General del Consejo Superior de Investigaciones Científicas*.

[2 Global Carbon Project, «Carbon Brief» p. 24/02/2022. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/>

[3 IEA, «Energy Technology Perspectives 2020 », IEA, Paris.
]

[4 Hannah Ritchie, «Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from? » Available: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>

[5 IEA, «Global electric vehicle stock by transport mode, 2010-2020 », IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-vehicle-stock-by-transport-mode-2010-2020>

[6 IEA, «Fuel cell electric vehicle stock by region, 2017-2020 », IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fuel-cell-electric-vehicle-stock-by-region-2017-2020>

Nexa® 1200 Instruction Manual, Version 2.2, © Heliocentris Academia GmbH

BEV4 Technical specification, Brandner Gruppe

Maual de uso del Melex, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial -CEDEA-

IEC 60050-485:2020, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 485: Fuel cell technologies

IEC 62282-5-100:2018, Fuel cell technologies - Part 5-100: Portable fuel cell power systems - Safety

TM PEFC ST 5-3, Testing the voltage and the power as function of the current density

<https://forums.ni.com/> - Foro de discusiones de LabVIEW

Red CYTED de Hidrógeno: Producción y usos en el transporte y el sector eléctrico H2TRANSEL

Manual de las tarjetas de adquisición de datos:

https://www.icpdas.com/web/product/download/software/utility_driver/dcon_utility_pro/document/manual/DCON_Utility_Pro_user_manual_en.pdf