



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Trabajo de Fin de Grado

“Diseño e implementación de cuadro de mando y
puesta en marcha de prototipo físico para la
simulación y detección de fugas en depósitos de
combustible”

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Autores: Raúl Lorenzo Parrado, Dimas Díaz Perdomo

Tutor: Pedro Antonio Toledo Delgado

Cotutor: Marta Sigut Saavedra

Julio de 2025

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Índice de contenido

Resumen	4
Abstract	4
1. Introducción	5
2. Estado de partida del prototipo	7
2.1 Hardware	7
2.1.1 Estructura física y distribución	7
2.1.2 Sensores y sistema de medición	8
2.1.3 Electrónica de control	8
2.1.4 Cableado y organización	9
2.2 Arquitectura software	10
2.2.1 Estructura general	10
2.2.2 Clases adicionales	12
2.2.3 Etapas de ejecución	12
3. Objetivos	14
4. Metodología de diagnóstico y depuración	15
4.1 Entorno de pruebas	15
4.2 Herramientas empleadas	15
4.3 Herramientas auxiliares	16
4.4 Diagnóstico modular	17
5. Errores detectados y soluciones aplicadas	18
5.1 Fallos de hardware	18
5.2 Errores de software	19
5.3 Problemas de mantenimiento	20
6. Diseño final del prototipo	21
6.1 Estudio previo y planificación	21
6.2 Dimensionamiento de la alimentación	22
6.3 Distribución física y cableado	22
6.4 Reducción de ruido y estabilización de sensores	23
6.5 Armario principal	23
6.6 Impresión 3D	24
6.7 Esquemas eléctricos	26
6.8 Prototipo final	27
7. Organización del trabajo y coordinación	27
7.1 Distribución progresiva de tareas	28
7.2 Coordinación y dinámica de trabajo	28
7.3 Validación conjunta y toma de decisiones	29
8. Validación funcional del sistema	30

1

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

8.1 Pruebas de verificación funcional	30
8.2 Pruebas de respuesta ante condiciones de emergencia	30
8.3 Pruebas de verificación de las nuevas funciones implementadas	30
8.4 Ensayos de resistencia prolongada	31
8.5 Generación de datasets para futuras investigaciones	32
9. Conclusiones	33
10. Conclusiones	34
11. Lineas futuras	35
12. Resumen de actuaciones y dedicación horaria	37
13. Presupuesto	39
14. Bibliografía	40
Anexos	41

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Índice de figuras

Figura 1: Distribución de depósitos	7
Figura 2: Montaje inicial de la unidad de control.	9
Figura 3: Panel de control físico.	10
Figura 4: Máquina de estados general.	11
Figura 5: Máquina de estados de depósito.	11
Figura 6: Prototipo en 3D.	21
Figura 7: Diseño lateral.	22
Figura 8: Lateral del Prototipo.	22
Figura 9: Caja de conexiones (Almacenamiento).	23
Figura 10: Armario principal.	24
Figura 11: Prototipo final de la planta automatizada.	27

3

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Resumen

Este Trabajo Fin de Grado documenta el proceso de puesta en funcionamiento y mejora de una planta automatizada, diseñada para simular una estación de servicio con el fin de generar datos útiles para la detección de fugas en depósitos subterráneos. A pesar de que el sistema había sido desarrollado en proyectos anteriores, presentaba múltiples errores de hardware y software que impedían su operatividad.

A lo largo del proyecto se identificaron y resolvieron fallos críticos como interferencias electromagnéticas, problemas de alimentación en los relés, lecturas inestables en sensores HX711, gestión incorrecta de volúmenes aleatorios y errores en la comunicación serie. Para su diagnóstico y corrección se implementaron herramientas de depuración propias, se mejoró la estructura del código y se aplicaron medidas físicas como el uso de cable apantallado, la separación de líneas sensibles y otras medidas que se detallarán a lo largo de la memoria.

Finalmente, se llevó a cabo el montaje definitivo del sistema incluyendo una caja eléctrica con bornas, carriles DIN y protecciones adecuadas, dejando la planta en un estado funcional, seguro y mantenable. El sistema ha sido validado mediante pruebas prolongadas y condiciones variables, demostrando su robustez y estabilidad. Este trabajo sienta una base sólida para futuros desarrollos orientados a la detección de fugas y a la docencia en entornos de automatización industrial.

Abstract

This Bachelor's Thesis documents the commissioning and technical improvement of an inherited automated plant designed to simulate a fuel station. The system's primary objective is to generate data useful for underground tank leak detection. Although developed in previous academic projects, the installation presented several hardware and software issues that made it non-operational.

Throughout the project, critical failures were identified and resolved, including electromagnetic interference, relay power issues, unstable readings from HX711 sensors, incorrect random volume generation, and serial communication errors. To diagnose and correct these faults, custom debugging tools were implemented, the software structure was improved, and physical measures were applied, such as shielded cabling and separation of sensitive signal lines.

The final stage involved the complete physical assembly of the system, including an electrical enclosure with DIN rails, terminal blocks, and proper protections, resulting in a stable, safe, and maintainable setup. The system was validated through extended runtime tests under varying conditions, proving its robustness and reliability. This work lays a solid foundation for future developments in leak detection and educational use in industrial automation environments.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

1. Introducción

Desde la revolución industrial, el consumo de petróleo y combustibles fósiles ha impulsado la industria y la vida cotidiana de las personas. Todos consumimos de forma directa o indirecta combustibles fósiles por lo que la seguridad a la hora de utilizar y almacenar dicho material cobra gran importancia. A la hora de almacenarlo, comúnmente se opta por colocar depósitos bajo tierra de forma que no ocupen grandes volúmenes de espacio útil. Aunque a priori es una solución ventajosa respecto otras alternativas, esto tiene ciertas desventajas. Como se comenta en [1], una fuga en un depósito subterráneo puede provocar una catástrofe ambiental al contaminar el suelo y las aguas subterráneas, afectando gravemente los ecosistemas y poniendo en riesgo la salud humana. Es aquí donde la detección de este tipo de fugas cobra gran importancia.

En el mundo de la automatización industrial, los sistemas de simulación física son herramientas clave para que estudiantes e investigadores desarrollen habilidades técnicas. En este caso en particular, el prototipo surgió como una forma de disponer de una fuente de datos ilimitados relacionados con el funcionamiento de una estación de servicio simulada, dada la dificultad de obtener registros reales.

Más allá de los componentes físicos del sistema (sensores, válvulas, bombas o depósitos), el verdadero desafío reside en diseñar una lógica de control lo suficientemente robusta y estructurada como para reproducir con fiabilidad los distintos estados operativos de la planta tales como condiciones iniciales, fases de venta, llenado del depósito de descargas, gestión de fugas, etc. Esta lógica debe conseguir que los datos sean válidos como base para futuras aplicaciones, como el desarrollo de algoritmos de detección de fugas.

Este Trabajo Fin de Grado surge como respuesta a un reto concreto: mejorar y conseguir dejar en pleno funcionamiento una planta automatizada de la Universidad de La Laguna que simula una gasolinera. La instalación acumulaba problemas físicos (cableados defectuosos, tuberías con fugas, etc) y errores de software que la hacían impredecible. Es por ello por lo que, en esta memoria, se detallarán los pasos seguidos y las modificaciones realizadas tanto a nivel físico como lógico para alcanzar un sistema estable, seguro y funcional.

El proyecto se fundamenta en trabajos previos realizados por otros estudiantes, centrados en el desarrollo de sistemas de simulación y/o detección de fugas de combustible en tanques de almacenamiento de estaciones de servicio.

- ❖ TFG "Diseño e implementación de un sistema autónomo para la simulación de fugas en depósitos" [2], del ingeniero Luis Arriaga Campos, donde se plantea la idea original que ejecuta procesos de llenado y vaciado de los depósitos de la estación de repostaje que simula. Fue la base del software que más adelante se fue perfeccionando.
- ❖ TFM "Diseño e implementación de un sistema autónomo para la detección de fugas en depósitos" [3], del ingeniero Nicolás Yanes Pérez, el cual se encargó de realizar un simulador software para la generación de ficheros de datos.
- ❖ TFG "Prototipo de bajo coste para la simulación de fugas en depósitos de una estación de servicio con fines docentes y de investigación" [4], del ingeniero Eduardo Miguel

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Gastón Quesada, encargado de hacer un prototipo inicial de bajo coste, que más adelante se remplazaría por el actual.

❖ TFG "Simulación y detección de fugas en depósitos de combustible" [5], realizado por el ingeniero Fernando Rodríguez Herrera, donde se realizó todo el montaje inicial del prototipo actual de la planta.

Los últimos trabajos realizados sobre la planta son:

❖ TFG "Puesta en marcha y mejora de usabilidad de un prototipo físico para la simulación y detección de fugas en depósitos de combustible" [6], del ingeniero Gregorio José Medina León. Entre sus principales aportes destacan la incorporación de un sistema de bajante para prevenir desbordamientos en caso de errores de control, el diseño de un panel de control físico que permite interactuar directamente con la planta, la creación de dos clases como parte del código que gestiona el funcionamiento del prototipo, una denominada *Debug*, orientada a mostrar información relevante por puerto serial para facilitar el diagnóstico y la detección de fugas durante las pruebas y otra denominada *PanelControl*, dedicada al control e interpretación de las señales provenientes del panel físico, y por último desarrolló una interfaz gráfica que permite la fácil interpretación y monitorización de la planta .

❖ TFM "Diseño e implementación de un sistema SCADA para un prototipo físico para la simulación de fugas en depósitos de combustible" [7], del ingeniero Alexander Epifanio Corona Ledesma, que se centró en dotar al sistema de una interfaz gráfica avanzada para la monitorización y supervisión remota del funcionamiento del prototipo. Este trabajo permitió representar visualmente los estados de la planta en tiempo real, registrar datos experimentales, e integrar capacidades de control básico a través de red local, mejorando significativamente la usabilidad y escalabilidad del sistema con vistas a futuras investigaciones o entornos docentes.

2. Estado de partida del prototipo

El prototipo automatizado recibido como base para el presente Trabajo Fin de Grado simulaba el funcionamiento de una estación de servicio, incluyendo procesos como el llenado, almacenamiento, dispensación y fuga de combustible. Debido a los riesgos asociados a trabajar con combustible en un entorno docente, éste se ha reemplazado por agua. Aunque la estructura general y el conjunto de depósitos estaban montados, el sistema presentaba múltiples deficiencias a nivel físico, eléctrico y lógico, que impedían su correcto funcionamiento.

2.1 Hardware

2.1.1 Estructura física y distribución

Tal y como se muestra en la Figura 1, la planta se encuentra instalada sobre una estructura metálica tipo bastidor de estantería, dividida en cinco niveles funcionales:

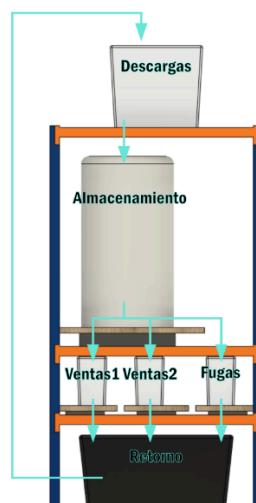


Figura 1: Distribución de depósitos. Extraído de [6]

- **Nivel inferior:** depósito de retorno (capacidad: 150 L), encargado de recoger el agua de ventas y fugas.
- **Nivel 1:** depósitos de Ventas 1, Ventas 2 y Fugas (4 L cada uno).
- **Nivel 2:** depósito de Almacenamiento o principal (125 L), simula el tanque subterráneo.
- **Nivel 3:** zona reservada para la electrónica de control.
- **Nivel superior:** depósito de Descargas (33 L), que representa el camión cisterna.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Todas las conexiones hidráulicas se realizaron con tubería rígida de PVC. Las bombas instaladas incluían tanto modelos sumergibles de 12 V DC y 19W (para llenado/vaciado de ventas y fugas) con un caudal teórico de 800 L/h y una altura de elevación de 5 m, como una bomba de 220 V AC y 85 W con un caudal teórico de 3800 L/h y una altura de elevación de 3,8 m, (para el retorno al depósito superior). Cada bomba de 12V estaba asociada a una electroválvula de 12 V DC, configuradas para trabajar en paralelo.

2.1.2 Sensores y sistema de medición

El sistema incorporaba diversas tecnologías de medida:

- Básculas, las cuales se usan para poder medir los volúmenes de los depósitos con la precisión requerida:
 - Depósitos de ventas y fugas: básculas de cocina genéricas (5 kg, resolución de 1 g).
 - Depósito de almacenamiento: báscula industrial WANT WT3002L (300 kg, resolución de 10 g).
 - Descargas: inicialmente con báscula, pero sin conectar.
- Sensores de nivel capacitivos (XKC-Y26-V) en el depósito de Descargas, ubicados a distintas alturas (1, 5, 20 y 30 L).
- Todas las básculas utilizan el módulo HX711 como interfaz entre las celdas de carga y el Arduino.

2.1.3 Electrónica de control

El sistema está controlado por una placa Arduino Mega 2560, conectada a:

- Un módulo de 16 relés, encargado de accionar bombas y válvulas.
- Un controlador L298N para gestionar la bomba peristáltica de simulación de fugas.
- Una segunda placa Arduino (no utilizada en este proyecto) prevista para pruebas de detección de fugas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

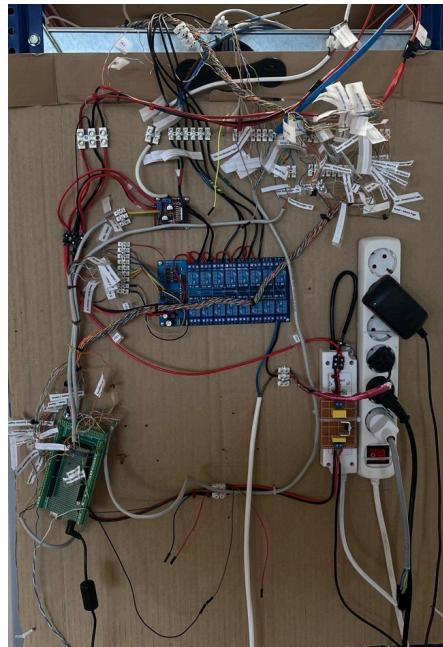


Figura 2: Montaje inicial de la unidad de control.

Como se observa en la figura 2, la electrónica se encontraba montada sobre una base de cartón, sin caja de protección, con una regleta doméstica como sistema de alimentación, y sin separación física entre el cableado de baja y alta tensión.

2.1.4 Cableado y organización

La alimentación y transmisión de señales entre los distintos módulos del sistema se realizaba mediante cableado de cobre, combinando hilos de distintas secciones en función de su uso. El cableado original mostraba una disposición compacta, en la que convivían líneas de alimentación, señales digitales y conexiones analógicas en un espacio reducido. A continuación se describen las características generales del cableado y la organización original del sistema:

- Cables de señal de 5 V obtenidos de hilos de cables Ethernet.
- Cables de 12 V de sección mayor (2.5 mm^2).
- Organización muy compacta: cables de alimentación, señales digitales y analógicas compartían espacio sin canaletas ni aislamiento.
- Etiquetas presentes, muy útiles para la identificación de cada cable.
- Se detectaron cables oxidados, conexiones sueltas, contactos intermitentes y un potenciómetro defectuoso, con daños por corrosión.



Figura 3: Panel de control físico.

Estas condiciones, visibles en la Figura 3, generaban interferencias eléctricas, comportamiento errático de relés y sensores, y dificultades para la depuración del sistema

2.2 Arquitectura software

El sistema heredado está programado siguiendo un enfoque de programación orientada a objetos, lo que permite organizar el código en clases que modularizar el comportamiento de los distintos componentes de la planta. Esta arquitectura modular facilita la comprensión y el mantenimiento del sistema, al tiempo que permite una clara separación de responsabilidades. La lógica de control general se estructura mediante máquinas de estados de tipo Moore, combinadas con una jerarquía entre clases específicas como las de depósitos, panel de control o debug.

2.2.1 Estructura general

La lógica de control se organiza mediante dos máquinas de estados principales, representadas en las Figuras 4 y 5:

- **Máquina de estado general (Controladora):** Encargada de gestionar los modos de operación global del sistema, incluyendo las fases de Inicialización, Funcionamiento Normal, Pausa, Fin de Experimento y Emergencia (véase Figura 4).

MÁQUINA DE ESTADOS GENERAL (CONTROLADORA)

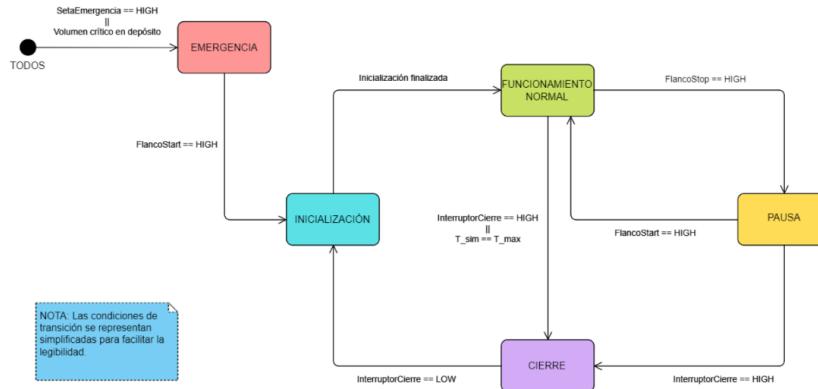


Figura 4: Máquina de estados general. Extraído de [6]

- **Máquina de estado de depósitos:** Instanciada de forma independiente para los depósitos activos (Descarga, Almacenamiento, Ventas y Fuga), definía los estados de Tanque Vacío, Llenado, Tanque Lleno y Vaciado (véase Figura 5).

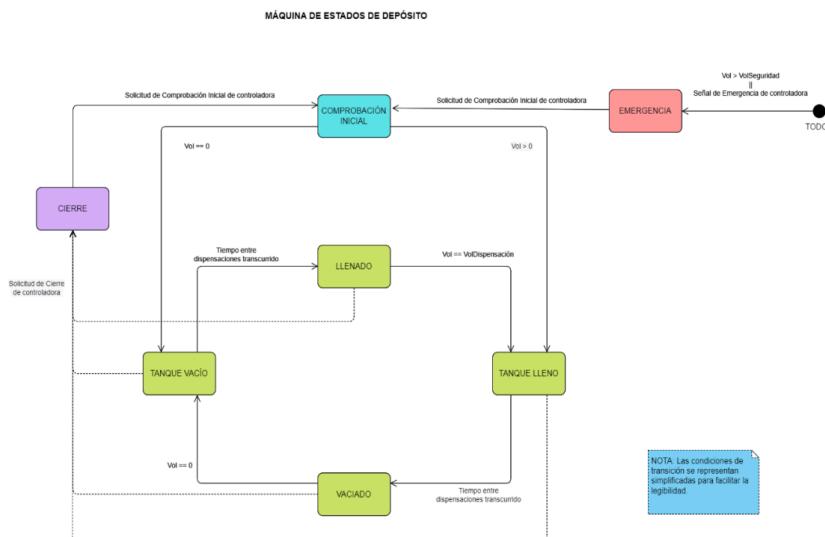


Figura 5: Máquina de estados de depósito. Extraído de [6]

Ambas estructuras de control estaban implementadas desde el diseño original en archivos independientes, y su funcionamiento se basa en la ejecución periódica de funciones que gestionan de forma autónoma la evolución temporal de cada subsistema, considerando variables como el tiempo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 10/07/2025 16:00:35

DIMAS DÍAZ PERDOMO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10/07/2025 16:02:05

Pedro Antonio Toledo Delgado
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10/07/2025 17:11:51

transcurrido y los volúmenes previstos. Esta arquitectura modular se ha mantenido en el proyecto actual debido a su claridad y potencial de escalabilidad, aunque se han introducido numerosas correcciones y mejoras que han aumentado la robustez del sistema y su precisión durante los ciclos de funcionamiento.

2.2.2 Clases adicionales

Además de las máquinas de estado, el código cuenta con otras clases especializadas:

- **Clase PanelControl:** Permite abstraer el uso de los elementos del panel físico (interruptores, pulsadores, potenciómetros y LEDs) a través de funciones para comprobar el estado, leer un valor o encender un led. Incluía funcionalidades de parpadeo y control de intensidad para los LEDs según el estado del proceso o el volumen del depósito correspondiente.
- **Clase Debug:** Diseñada para facilitar el envío de mensajes por puerto serie con distintos niveles de detalle. Permite ajustar dinámicamente el tipo de depuración y la frecuencia de envío, y ofrecía una interfaz centralizada para la salida de mensajes en distintos puntos del programa.

2.2.3 Etapas de ejecución

El código incluye un bloque de inicialización secuencial, compuesto por una serie de etapas diseñadas para preparar adecuadamente el estado físico y lógico de la planta antes de iniciar cualquier simulación. Este proceso es gestionado en el modo de inicialización e incluye las siguientes fases:

- **Pre-vaciado:** Estado de espera inicial tras el arranque del sistema. Invoca actualizar_estado() de todos los depósitos con ComprobacionInicialControladora a 1 para que los depósitos hagan una primera comprobación.
- **Vaciado:** Permite purgar los depósitos seleccionados para garantizar que comienzan desde un volumen nulo. En modo pulsación, el vaciado se realiza mientras el botón correspondiente se mantiene presionado; en modo temporizado, se activan las válvulas durante un periodo fijo.
- **Recirculación:** Permite redistribuir agua entre depósitos para asegurar que el nivel supera la altura mínima de las válvulas de salida, evitando así el funcionamiento en vacío de las bombas en etapas posteriores.
- **Tara:** Etapa crítica en la que se fijaban las lecturas actuales de las básculas como punto de referencia (cero lógico), corrigiendo posibles desviaciones iniciales.
- **Calibración:** Se llena el depósito de Descargas en niveles controlados para su posterior pesaje en el depósito de Almacenamiento, permitiendo mapear con precisión los sensores de nivel.
- **Condiciones iniciales:** Se establecen volúmenes aleatorios en los depósitos de Descargas y Almacenamiento y se añaden márgenes de seguridad en Ventas y Fugas, con el objetivo de introducir variabilidad controlada en los experimentos.
- **Pre-funcionamiento normal:** Etapa final de preparación en la que el sistema permanece en espera de una orden del operador para iniciar el ciclo operativo principal.

12

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Este bloque de inicialización no se implementó como una máquina de estados independiente, sino como parte integrada dentro de la lógica principal del sistema. No obstante, ofrece al usuario la posibilidad de omitir determinadas etapas a través del panel de control físico. Este diseño ofrece flexibilidad sin comprometer la robustez operativa del sistema.

Una vez completada la inicialización, el sistema transiciona al estado de Funcionamiento Normal, en el cual se realiza de forma cíclica dispensaciones controladas entre depósitos, simulando situaciones operativas reales de una estación de servicio. Los parámetros de volumen y momento de la dispensación son determinados mediante funciones pseudoaleatorias, con el fin de generar escenarios variables y útiles para pruebas de algoritmos de detección de fugas.

Adicionalmente, la máquina de estados contempla modos especiales de operación:

- Pausa: Permite detener temporalmente la ejecución sin perder el estado del sistema, reanudando posteriormente desde el mismo punto.
- Cierre o fin de experimento: Estado final en el que se desactivan las bombas y válvulas, y se procede al vaciado completo de los depósitos.
- Emergencia: Activado automáticamente al alcanzarse volúmenes críticos o al pulsar la seta de emergencia. En este estado, se cierran todas las válvulas y se detiene la ejecución a la espera de intervención del operador.

Este enfoque secuencial y controlado permite asegurar que cada experimento comienza desde un estado reproducible, al tiempo que incorpora mecanismos de seguridad y control avanzados para gestionar eventos anómalos.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

3. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es remodelar la construcción tanto física como software de la planta para hacerla robusta, solucionar los problemas hardware y software del prototipo de llenado de tanques permitiendo trabajar largos períodos de tiempo sin errores e incluso sobreponiéndose a éstos, manteniendo el objetivo general de la planta: la generación de datos los cuales simulan una estación de servicio real. Para facilitar el trabajo se establecieron subobjetivos a realizar que permitían focalizar los esfuerzos de forma eficiente. Algunos de estos fueron establecidos previamente, como la modificación del software y la implementación del diseño final y otros a medida que fueron necesarios, tales como la reparación de la fontanería y el cableado, la poca robustez de la planta ante ejecuciones largas, etc. A continuación, se detallan dichos subobjetivos:

- **Reparación de fugas y estado del agua:** Se detectaron pérdidas de agua en las conexiones entre tuberías, codos, válvulas, por lo que decidimos establecer como primer objetivo eliminar las fugas de las conexiones y los cierres defectuosos de las válvulas.

Además, se detectó un problema con el estado del agua. Al tratarse de agua de la red sin tratar, el estancamiento de la misma generó un tipo de alga o solidificación del agua resultando en una capa viscosa y verdosa que provocaba que las electroválvulas no cerraran correctamente.

- **Reparación del cableado:** Se detectaron numerosos fallos que una vez identificados decidimos abordarlos revisando y reparando el cableado. La planta presentaba una mala selección de cables, tanto en tipo como en sección.
- **Modificación del software:** El objetivo principal o primer objetivo que se estableció fue solucionar los problemas de código aunque fue necesario cumplir los dos objetivos anteriores en primer lugar. Mediante simulaciones focalizadas en las distintas fases de ejecución del programa se identificaron errores de concepto o mala implementación.
- **Robustez de las ejecuciones:** Se estableció como objetivo una vez la planta funcionaba según lo establecido dar robustez a las simulaciones o generaciones de datos. Se identificaron problemas de saturación de comunicaciones, alimentación eléctrica insuficiente, saturación del controlador, etc.
- **Implementación del diseño final:** Se dividió este objetivo en dos principales: El estudio previo de las modificaciones a implementar o mejorar respecto al diseño anterior, material y herramientas necesarias y el planteamiento físico de los elementos que componen el resultado final de la planta.
- **Implementación de la báscula de descargas:** Objetivo no conseguido, el cual se basaba en la implementación de una quinta báscula en el depósito de descargas que permitiera el control exacto del volumen de agua alojada en dicho depósito y la posibilidad de eliminar el proceso “Calibración” el cual tomaba bastante tiempo de ejecución siendo reemplazado por un tarado de la báscula.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

4. Metodología de diagnóstico y depuración

Para la depuración del sistema se adoptó una estrategia basada en la observación directa del comportamiento de la planta, el análisis estructurado del código fuente y la verificación física de los elementos de control. Esta metodología, de carácter iterativo, permitió aislar y corregir tanto fallos lógicos en el software como defectos eléctricos en la instalación.

4.1 Entorno de pruebas

Todas las pruebas se realizaron sobre la planta real, prescindiendo de simuladores. El sistema era puesto en marcha bajo condiciones controladas, repitiendo secuencias completas de funcionamiento con el fin de observar transiciones erráticas, comportamientos anómalos o paradas imprevistas.

4.2 Herramientas empleadas

Para la detección y análisis de errores se emplearon las siguientes herramientas:

- **Función de impresión con buffer**

Se implementaron funciones printMensaje() y printNúmero() capaces de enviar por pantalla únicamente los mensajes relevantes o aquellos que experimentaran cambios respecto al ciclo anterior. Esto evitó saturaciones en la interfaz serial y contribuyó a reducir los reinicios del microcontrolador.

La función personalizada printMensaje() evita que se impriman mensajes repetidos por el puerto serie. Para ello, compara cada nuevo mensaje con un buffer circular que almacena los últimos cinco mensajes enviados. Si el mensaje no está repetido, lo imprime y lo guarda en el buffer. Esto permite reducir la carga en la comunicación serial y evita saturaciones o reinicios inesperados del microcontrolador.

printMensaje(String Mensaje):

```
void printMensaje(String Mensaje) {  
    bool mensajeRepetido = false;  
    for (int i = 0; i < 5; i++) {  
        if (Mensaje == buffer[i]) {  
            mensajeRepetido = true;  
            break;  
        }  
    }  
    if (!mensajeRepetido) {  
        Serial.println(Mensaje);  
        buffer[indiceBuffer] = Mensaje;  
        indiceBuffer = (indiceBuffer + 1) % 5;  
    }  
}
```

15

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

A su vez printNumero() es una variante diseñada para imprimir únicamente valores numéricos (por ejemplo, resultados de sensores o variables críticas), y solo cuando cambian respecto al valor anterior. Esto evita una impresión constante de datos redundantes y ayuda a depurar el sistema de forma más limpia y eficiente.

printNumero(float Entero):

```
void printNumero(float Entero){  
    if(Envio2 != Entero){  
        Serial.println(Entero);  
        Envio2 = Entero;  
    }  
}
```

- **Inspección visual y test funcional:** se realizaron observaciones directas del estado físico de válvulas, bombas y LEDs para contrastar con el comportamiento esperado según el estado de la máquina.
- **Multímetro:** Se utilizó un multímetro digital para la verificación de voltajes, corrientes y continuidad en distintas partes del circuito. Esta herramienta resultó esencial para la detección de errores eléctricos como conexiones defectuosas, cables interrumpidos y caídas de tensión anómalas
- **Análisis estructurado del código:** se revisó línea por línea el comportamiento de funciones clave como actualizar_estado(), así como la lógica de generación de volúmenes, el tratamiento de transiciones entre fases y el funcionamiento de la bomba de fugas.

4.3 Herramientas auxiliares

Además de los recursos específicamente empleados para la validación y depuración del sistema, durante el desarrollo del proyecto se utilizaron diversas herramientas auxiliares que facilitaron la planificación, la documentación y el montaje físico final del prototipo:

- **Google Docs:** utilizado como plataforma de redacción colaborativa de la memoria, permitiendo un seguimiento conjunto del contenido, versiones y aportaciones de los miembros del equipo.
- **Google Sheets:** empleado como diario técnico, donde se registraron cronológicamente las incidencias detectadas, pruebas realizadas, hipótesis de fallo y soluciones aplicadas.
- **Impresora 3D:** utilizada para diseñar y fabricar soportes personalizados sobre carril DIN para alojar de forma ordenada la placa Arduino Mega, el módulo de relés y el controlador de la bomba peristáltica. Esta medida contribuyó a la organización del cableado y la robustez estructural del sistema.
- **Herramientas manuales:** se hizo uso de taladros, destornilladores, pinzas, alicates y otras herramientas básicas durante las tareas de desmontaje del prototipo original y el posterior ensamblaje final.

16

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

- **AutoCad:** Este software se empleó para el desarrollo de la documentación eléctrica.

Estas herramientas, si bien no intervinieron directamente en el funcionamiento lógico del sistema, resultaron esenciales para lograr un entorno de trabajo ordenado, reproducible y adecuadamente documentado.

4.4 Diagnóstico modular

Dado el alto grado de acoplamiento entre los distintos subsistemas, no fue posible realizar una depuración por componentes aislados. En su lugar, se estableció una metodología por fases, centrada en validar de forma individual cada una de las etapas funcionales del ciclo de simulación:

- **Inicialización:** se verificó el correcto paso por cada una de las etapas (vacío, recirculación, tara, calibración y condiciones iniciales), así como el efecto de los potenciómetros sobre los valores de configuración de fugas.
- **Funcionamiento Normal:** se controló la estabilidad de las dispensaciones, el cumplimiento de los tiempos aleatorios y el volumen de dispensación.
- **Emergencia y Cierre:** se simuló el comportamiento frente a eventos críticos, comprobando que todas las válvulas se cerraran correctamente y que los indicadores de alarma se activaran de forma inmediata.

Con el objetivo de verificar el funcionamiento independiente de cada báscula y su circuito asociado, se desarrolló un código específico que permitía activar individualmente las bombas y válvulas asociadas a cada depósito, así como visualizar la lectura en tiempo real del módulo HX711 correspondiente. Esto permitió confirmar la correcta respuesta del sistema, aislar interferencias o lecturas erráticas sin afectar el resto de la lógica del sistema.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

5. Errores detectados y soluciones aplicadas

Durante la puesta a punto de la planta automatizada se identificaron múltiples errores que comprometían tanto la fiabilidad como la estabilidad del sistema. A continuación, se detallan los fallos más relevantes clasificados por categoría, así como las soluciones técnicas implementadas en cada caso.

5.1 Fallos de hardware

- Cables defectuosos y conexiones inestables:** Se detectaron numerosos cables con óxido, soldaduras defectuosas, clemas en mal estado y conexiones sueltas. Esto provocaba falsos contactos, reinicios y pérdida de señal en sensores. Además, se identificó una inadecuada selección de los conductores: en varios tramos se utilizaban cables de datos de un solo hilo (capilar sólido), originalmente diseñados para señales, como si fuesen cables de alimentación. Esta elección incorrecta generaba problemas de sobrecalentamiento durante simulaciones prolongadas. Inicialmente, se procedió al recambio de los cables afectados y al ajuste de las conexiones, pero en etapas posteriores, especialmente durante el montaje definitivo, se optó por utilizar cable apantallado y conductores adecuados en sección y tipo, con el fin de minimizar interferencias y mejorar la fiabilidad del sistema.
- Interferencias electromagnéticas:** La lectura de los sensores HX711 resultaba altamente inestable, con picos que interrumpían la lógica de control, provocando llenados erróneos o saltos de estado no justificados. Tras identificar que la bomba de retorno, que funciona con corriente alterna, generaba ruido significativo, se procedió a separar físicamente su cableado del resto de líneas sensibles y se incorporaron condensadores de 100 nF en las líneas de alimentación de los sensores. Finalmente, se sustituyó todo el cableado de señal por conductores apantallados.
- Problemas de alimentación en relés y módulos:** Se observó que el sistema sufría reinicios del microcontrolador y fallos intermitentes en la activación de relés. El problema se debía a una alimentación insuficiente. La solución consistió en una fuente de 5V externa con 3A.
- Fallo en potenciómetro de control de altura de fuga:** Este potenciómetro tenía como función definir la altura a partir de la cual debía generarse la fuga simulada, actuando como parámetro de control para la activación de la bomba peristáltica. Estaba ubicado en el panel de control físico, junto al resto de elementos de entrada analógicos y digitales.

Durante el proceso de validación, se observó que el valor correspondiente permanecía constante independientemente de la posición del potenciómetro. Para confirmar el fallo, se midió directamente su resistencia con un multímetro digital, obteniéndose una lectura fija de 0 Ω en todo su recorrido, lo cual indicaba un cortocircuito interno. El componente fue retirado y reemplazado por uno nuevo, recuperando así la funcionalidad esperada.

- Errores en sensores HX711:** Los sensores HX711 de Ventas 1 y del tanque de Almacenamiento presentaban lecturas erráticas, incluyendo valores negativos y saltos no justificados. Se procedió a su sustitución por nuevos HX711.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

5.2 Errores de software

- **Generación incorrecta de volúmenes aleatorios:** La función random() se utilizaba de forma incorrecta para generar valores decimales, provocando que el volumen generado fuera siempre un valor entero igual a 1. Se cambió la lógica multiplicando el resultado de random() por 100, convirtiéndolo en float, y dividiéndolo nuevamente para obtener la resolución deseada.

Durante simulaciones prolongadas, se observó que el comportamiento de la planta tenía a generar largos períodos de inactividad. Esto ocurría porque el depósito de almacenamiento se vaciaba más rápido de lo previsto y la planta quedaba detenida esperando una nueva descarga desde el depósito superior. Este fenómeno se debía a una mala configuración de los rangos de generación aleatoria tanto para el volumen de dispensación como para el intervalo entre eventos. La solución consistió en ajustar adecuadamente los valores mínimo y máximo en las funciones responsables de GenerarVolumenDisp() y GenerarInstanteProxDisp(), logrando así una distribución más realista y sostenible del flujo de agua entre depósitos durante todo el experimento.

- **Intento de vaciado sin volumen suficiente:** En algunos casos el sistema intentaba vaciar depósitos sin que estos contuvieran líquido suficiente, lo que producía ciclos de bombeo en vacío. Para evitarlo, se añadieron condiciones en el código que obligan a verificar un volumen mínimo antes de iniciar una descarga.
- **Reinicio del sistema por saturación de mensajes seriales:** El envío excesivo de mensajes por Serial.println() causaba inestabilidad, incluyendo bloqueos y reinicios. Para mitigar esto, se implementaron dos funciones personalizadas (printMensaje() y printNúmero()) que filtran los mensajes repetidos mediante un buffer circular y evitan la redundancia innecesaria de información.
- **Problemas de sincronización:** Se descubrió que, en ausencia de tráfico en el puerto serie, el código ejecutaba los estados demasiado rápido, provocando que relés y válvulas no se activaran correctamente. Para corregirlo, se incorporó un retardo fijo (delay(30)) que asegura la estabilidad de las señales sin comprometer el rendimiento global.
- **Fallo en LED de emergencia:** El LED correspondiente al estado de emergencia no se encendía, debido a una omisión en su inicialización. Se modificó el código para activar el indicador de forma fiable al entrar en estado de emergencia.
- **Generación incorrecta del caudal de fuga:** Durante la validación del comportamiento del depósito de Fugas, se detectó un fallo en la función que calculaba el caudal según la altura y el tamaño del orificio de fuga, ambos controlados mediante potenciómetros.

La condición lógica que debía comprobar si el volumen del depósito anterior superaba la altura establecida para iniciar la fuga estaba invertida. Esto hacía que la bomba de fugas se activara incluso en condiciones no válidas, generando comportamientos erráticos.

Además, la operación map() utilizada para transformar la lectura del potenciómetro de dimensiones siempre devolvía un valor nulo. Esto se debía a que la función realizaba un mapeo entre enteros y, al aplicar valores pequeños dentro de un rango amplio, la resolución se

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

perdía. La solución consistió en escalar manualmente el resultado multiplicándolo por 100 antes de dividirlo, lo que permitió recuperar valores decimales útiles y ajustar correctamente el PWM de la bomba peristáltica.

5.3 Problemas de mantenimiento

Durante la puesta a punto de la planta también se detectaron diversos problemas relacionados con el mantenimiento:

- **Obstrucción de electroválvulas:** Se identificaron obstrucciones parciales en varias electroválvulas, concretamente en la válvula entre el depósito de Descargas y el de Almacenamiento, así como en la situada entre el depósito de Almacenamiento y el de Ventas 1. La causa principal fue la acumulación de residuos sólidos en el interior de las tuberías, incluyendo restos de plástico procedente del montaje original y suciedad transportada por la bomba sumergible de retorno ubicada en el depósito inferior. Este problema llegó a provocar un bloqueo en las electroválvulas, las cuales permanecían parcialmente abiertas, permitiendo el flujo de agua por gravedad incluso cuando debían estar cerradas.
- **Fugas en conexiones hidráulicas:** En varias secciones de la instalación se detectaron pequeñas fugas localizadas en uniones que habían sido selladas únicamente con cinta de teflón. Estas uniones, sometidas a presión y vibraciones repetidas, acababan cediendo con el tiempo. La solución consistió en desmontar dichas secciones y aplicar nuevamente el sellado, asegurando una mayor estanqueidad.
- **Transporte de suciedad por la bomba de retorno:** La bomba centrífuga de AC utilizada para devolver el agua desde el depósito de Retorno al depósito de Descargas transportaba una cantidad significativa de residuos. Esta suciedad alcanzaba el resto del sistema y contribuía tanto a las obstrucciones ya mencionadas como a ensuciar depósitos y válvulas.
- **Accesibilidad y labores de limpieza:** Aunque el sistema presenta una accesibilidad razonable para la revisión de componentes, fue necesario vaciar completamente todos los depósitos para poder realizar una limpieza efectiva. Estas labores resultaron esenciales para restaurar el funcionamiento de válvulas y sensores.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

6. Diseño final del prototipo

Una vez resueltos los principales errores de hardware y software que presentaba el prototipo, se procedió a llevar a cabo el montaje definitivo del sistema de control y distribución eléctrica de la planta. Esta fase tenía como objetivo consolidar las soluciones aplicadas durante el desarrollo del TFG, mejorar la organización física del cableado y garantizar la fiabilidad y mantenibilidad del sistema en un entorno prolongado de operación.

6.1 Estudio previo y planificación

Antes del montaje, se realizó un replanteo físico de los nuevos elementos: cajas de registro estancas, canaletas, tuberías de conexión y el armario principal de control. También se redimensionaron las fuentes de alimentación, ya que inicialmente la planta utilizaba hasta cuatro fuentes distintas incluyendo la alimentación USB del propio Arduino, lo cual era ineficiente y generaba posibles diferencias de potencial.

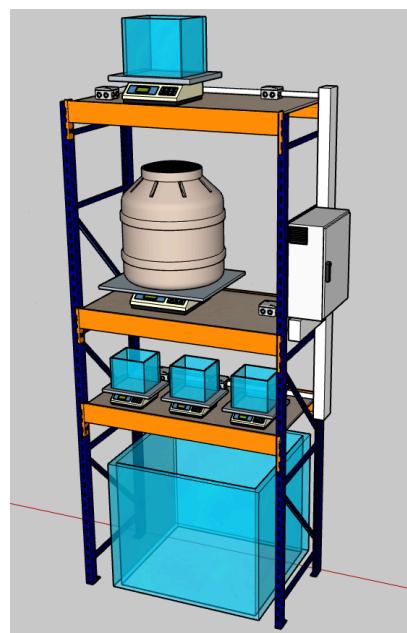


Figura 6: Prototipo en 3D.

Se realizó un esquema 3D en la plataforma de diseño SketchUp (véase Figura 6), el cual se puede encontrar en el repositorio de este TFG [8]. Mediante la biblioteca de recursos se incluyeron en el esquema algunos elementos reales como la estantería industrial, las básculas o el armario principal de conexión mientras que otros elementos como las canaletas o depósitos se diseñaron mediante el propio software de diseño. Dichos esquemas sirvieron como planteamiento a seguir para la implementación final.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

6.2 Dimensionamiento de la alimentación

Se realizó un cálculo del consumo máximo simultáneo basado en el peor escenario posible:

- 4 relés activados: $4 \times 90 \text{ mA} = 360 \text{ mA}$
- Módulo L298N: 36 mA
- 7 LEDs activos: $7 \times 20 \text{ mA} = 140 \text{ mA}$

Total estimado: **536 mA**, sin contar el consumo propio del Arduino ni pérdidas por conexiones. Para asegurar margen, se instaló una fuente de alimentación de **5V y 3A**, lo que cubre posibles ampliaciones futuras.

6.3 Distribución física y cableado

La disposición de cajas y tuberías se basó en el diseño propuesto en el TFG de Gregorio Medina [6], pero se adaptó a las dimensiones reales del material disponible. Se priorizó que todas las entradas de cableado al armario principal se hicieran por la parte inferior, minimizando el riesgo de entrada de agua por escurrimiento en caso de humedad o inundación.

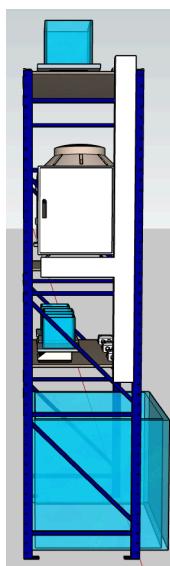


Figura 7: Diseño lateral.



Figura 8: Lateral del Prototipo.

Cada nivel de la planta cuenta con una caja de registro estanca, desde donde se distribuye la alimentación y señal a los componentes del estante correspondiente. Estas cajas están conectadas entre sí y con la canaleta principal vertical mediante tubería rígida de PVC de 25 mm, lo que proporciona orden, protección y facilidad de mantenimiento. La disposición detallada de estas conexiones puede consultarse en el anexo 10 de esta memoria, donde se documenta gráficamente el trazado de tuberías y la distribución por niveles.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

6.4 Reducción de ruido y estabilización de sensores

Una de las prioridades fue proteger las señales analógicas de interferencias. Para ello, se utilizaron cables apantallados de $4 \times 1 \text{ mm}^2$ para las conexiones de las HX711, conectando la malla al potencial de 0 V de la planta. Además, se instalaron condensadores de 100 nF en la alimentación de los módulos para filtrar ruido de alta frecuencia.

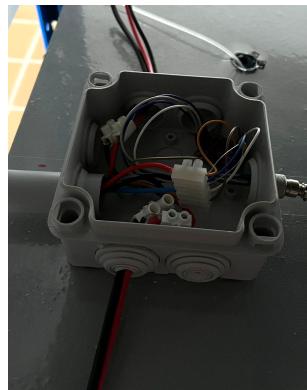


Figura 9: Caja de conexiones (Almacenamiento).

La alimentación de las básculas se independizó del resto del sistema, y se completó el recableado con soldadura de estaño y fundas termoreträctiles para mejorar la estanqueidad frente a humedad.

Como paso final, se recalibraron todas las básculas del sistema. Las nuevas conexiones y soldaduras afectaban los valores de referencia anteriores, por lo que fue necesario ajustar los coeficientes de calibración para garantizar precisión en las mediciones.

6.5 Armario principal

El armario de control se diseñó siguiendo criterios industriales. Se instalaron carriles DIN, canaletas internas y una distribución clara de elementos (véase Figura 10):

- Módulo de relés
- Regulador de tensión L298N
- Placa Arduino Mega
- Bornas, protecciones y elementos auxiliares

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51



Figura 10: Armario principal.

Los elementos no compatibles con carril DIN se montaron sobre soportes 3D impresos, adaptados desde bibliotecas de modelos, que se encuentran en el anexo 1. Dichos soportes fueron rediseñados para reducir volumen y permitir una orientación eficiente dentro del armario. Se dejó espacio adicional para un PLC auxiliar, previsto para futuros desarrollos académicos.

Adicionalmente, todo el sistema de control fue dotado de conexión a tierra, incluyendo un cable de masa unido a la estructura metálica. Esto mejora la seguridad eléctrica, mitiga interferencias electromagnéticas y contribuye al cumplimiento de normativas industriales.

6.6 Impresión 3D

Durante la fase final de integración del sistema, se recurrió al uso de impresión 3D para la fabricación de soportes específicos destinados al montaje de componentes electrónicos sobre carriles DIN. Esta solución no solo permitió una mayor flexibilidad de diseño, sino que mejoró considerablemente la organización interna del armario de control y la accesibilidad de los elementos instalados.

• Calibración y configuración de impresión

La impresora utilizada fue una Artillery X4 Pro, trabajando con filamento PLA de 1,75 mm de diámetro y color azul eléctrico. Se imprimió a una temperatura de boquilla de 215 °C y 60 °C en cama caliente. Antes de las primeras impresiones se realizaron pruebas de flujo, retracción y tolerancia, con el objetivo de garantizar la precisión dimensional de las

piezas. El proceso de impresión se llevó a cabo directamente sobre la cama de la impresora, sin necesidad de adhesivos adicionales.

En cuanto a los parámetros técnicos, se configuró una altura de capa de 0,1 mm (0,2 mm en la primera capa), dos paredes exteriores, cuatro capas superiores y dos inferiores. Se empleó un relleno de tipo gyroid con una densidad del 7 %, priorizando ligereza y rigidez estructural. La velocidad de impresión fue ajustada según tipo de capa, tal como se recoge en la tabla 1.

Tipo de capa o zona	Velocidad (mm/s)
Capa inicial	30
Relleno de la primera capa	30
Perímetro externo	60
Perímetro interno	80
Perímetros pequeños	50%
Relleno poco denso	100
Relleno sólido interno	200
Relleno sólido superior	60
Relleno de huecos	30

Tabla 1: Tabla de velocidades de impresión 3D

• Diseño y adaptación de modelos

Para el montaje de la placa Arduino Mega se partió de un modelo 3D original en disposición horizontal, el cual fue modificado completamente en Fusion 360 para permitir su instalación en posición vertical. Se rediseñaron los anclajes, se rotaron los planos de fijación y se ajustaron los huecos para incorporar tuercas embebidas que permiten el atornillado del microcontrolador.

De forma similar, se rediseñaron soportes para el módulo de relés y el controlador de motor L298N. Estos fueron adaptados específicamente al perfil del carril DIN estándar, garantizando su sujeción mediante clip integrado y medidas tomadas directamente sobre los elementos reales. En total, se imprimieron seis modelos distintos, entre ellos dos soportes para el controlador relé y dos para el L298N, uno horizontal y otro vertical para el Arduino, todos con resultados estructuralmente robustos.

Uno de los soportes tuvo que ser reimpresso tras detectarse un desajuste dimensional que impedía el anclaje firme del L298N, lo cual resalta la importancia de la verificación previa y la tolerancia en diseños de precisión.

Los modelos 3D se pueden encontrar en el repositorio de este TFG [8].

• Resultados obtenidos

Los soportes impresos cumplieron satisfactoriamente su función, permitiendo el montaje seguro y estético de los componentes en el armario eléctrico. Gracias a ellos, fue posible aprovechar al máximo los carriles DIN, reducir el cableado suelto, y dotar al cuadro de un aspecto ordenado y profesional. La resistencia mecánica alcanzada con los parámetros de impresión empleados fue más que suficiente para entornos de laboratorio, incluso bajo manipulación frecuente.

6.7 Esquemas eléctricos

Los detalles completos del cableado eléctrico, distribución de bornas y asignación de señales se encuentran documentados de forma estructurada en los anexos de esta memoria (Anexos 3 al 9).

Se tomó como referencia el esquema eléctrico ya existente, añadiendo las mejoras implementadas en el estudio previo a la implementación final.

Al igual que con el esquema 3D se utilizaron los modelos ya existentes y se crearon mediante las herramientas del propio software los modelos necesarios.

Una vez realizado el esquema se verificó mediante el archivo de programación el conexionado del arduino. Se realizó un esquema a detalle del conexionado de las bornas debido a la cantidad y complejidad de cables concentrados en un solo punto del cuadro, facilitando así futuras intervenciones sobre el cuadro. Dicho esquema se dejó impreso junto al cuadro para facilitar futuros trabajos.

Los esquemas eléctricos se pueden encontrar en el repositorio de este TFG [8].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

6.8 Prototipo final

El prototipo final quedó completamente funcional tras el montaje definitivo de todos los elementos físicos y eléctricos. En la Figura 11 se observa la disposición final de los depósitos, la integración del armario eléctrico lateral, el panel de control y la canalización ordenada del cableado. Esta configuración permite un funcionamiento prolongado, mantenible y seguro, alineado con los objetivos del proyecto.



Figura 11: Prototipo final de la planta automatizada.

7. Organización del trabajo y coordinación

El presente proyecto fue desarrollado de forma conjunta por dos estudiantes de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. Ambos figuran como coautores del Trabajo Fin de Grado y compartieron la responsabilidad de llevar la planta heredada a un estado operativo y robusto. El trabajo en equipo permitió dividir la carga de trabajo, tomar decisiones técnicas compartidas y abordar la depuración desde una perspectiva colaborativa.

7.1 Distribución progresiva de tareas

Aunque no se estableció un reparto cerrado desde el inicio, las tareas se fueron especializando conforme avanzaba el proyecto:

- **Montaje físico y pruebas:** El diseño del montaje definitivo de la planta, incluyendo la instalación de elementos eléctricos, canaletas, cajas de registro y distribución del cableado, fue realizado de forma conjunta. Ambos participaron en las fases de conexión, verificación funcional y validación prolongada.
- **Diseño e impresión 3D:** La adaptación de modelos, rediseño de soportes y fabricación mediante impresión 3D fue realizada por Raúl Lorenzo, incluyendo el rediseño completo del soporte para el Arduino orientado verticalmente, así como los soportes para el módulo de relés y el L298N.
- **Documentación y redacción:** La elaboración de la memoria fue un esfuerzo conjunto de Raúl Lorenzo y Dimas Díaz, quienes colaboraron en la estructuración, redacción y organización de los contenidos técnicos. Raúl asumió la coordinación principal del proceso, integrando las contribuciones de ambos y garantizando la coherencia técnica y formal del documento.
- **Esquemas eléctricos:** Dimas Díaz asumió la elaboración de los esquemas eléctricos del sistema, detallando la asignación de bornas, distribución de señales y planos de conexión que se incluyen en los anexos de esta memoria.
- **Desarrollo software:** La revisión, mejora e implementación de nuevas funciones en el código heredado fue una tarea compartida, con sesiones conjuntas de análisis, corrección de errores y validación del comportamiento del sistema en funcionamiento.

7.2 Coordinación y dinámica de trabajo

Las sesiones de trabajo presenciales se concentraron en el laboratorio, especialmente durante el montaje, validación funcional y calibración final. Este enfoque permitió una rápida detección y resolución de errores en las fases críticas del proyecto.

Para la coordinación remota, se utilizaron herramientas como Google Drive, Google Docs y WhatsApp, además de reuniones puntuales mediante Google Meet. Esto permitió mantener una comunicación constante y revisar de forma colaborativa tanto el código como los documentos técnicos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Las reuniones con los tutores se realizaron en momentos clave del proyecto: resolución de dudas complejas, revisión de avances, y validación de decisiones antes del montaje definitivo.

7.3 Validación conjunta y toma de decisiones

La validación del sistema fue abordada de forma conjunta, permitiendo ejecutar pruebas prolongadas, analizar el comportamiento de la planta y verificar las transiciones entre estados. Esta colaboración fue especialmente útil para identificar errores no evidentes o comportamientos inesperados, mejorando así la calidad del sistema final.

Asimismo, durante la redacción de la memoria, ambos participantes revisaron y validaron las secciones correspondientes a su área de responsabilidad, garantizando la fidelidad técnica del documento.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

8. Validación funcional del sistema

Tras el montaje definitivo, se diseñó un conjunto de pruebas sistemáticas orientadas a verificar el correcto funcionamiento de la planta en diferentes escenarios. Estas pruebas no solo permitieron demostrar la fiabilidad del prototipo en ciclos normales de trabajo, sino también su robustez ante eventos imprevistos, su comportamiento prolongado en el tiempo y su capacidad de generación de datos útiles para futuras investigaciones.

8.1 Pruebas de verificación funcional

La planta automatizada está basada en máquinas de estados tipo Moore, tanto a nivel global como en cada uno de los subsistemas activos. Por ello, una parte esencial de la validación consistió en comprobar que todos los estados definidos eran efectivamente alcanzados durante la operación. Se verificaron de forma controlada y en varias ocasiones todas las fases clave del ciclo de simulación: vaciado, recirculación, tara, calibración, establecimiento de condiciones iniciales, funcionamiento normal, pausa, cierre y emergencia.

Esta verificación se llevó a cabo tanto mediante observación directa del comportamiento físico de válvulas, bombas y LEDs, como mediante salidas por puerto serie utilizando funciones específicas (`printMensaje()` y `printNúmero()`) que informaban en tiempo real del estado de cada componente incluyendo los valores de las básculas. Esta doble vía permitió confirmar la correcta transición entre estados y la sincronización entre hardware y lógica de control.

8.2 Pruebas de respuesta ante condiciones de emergencia

Se realizaron también pruebas específicas para comprobar la respuesta del sistema frente a eventos anómalos o críticos. Se activó la parada de emergencia (seta) de forma manual en distintos momentos del ciclo (incluyendo inicialización, funcionamiento normal y procesos de cierre) y se verificó que el sistema respondía correctamente en todos los casos.

Tras la activación de la emergencia, todas las válvulas se cerraban de inmediato, las bombas se detenían, y se activaba el LED de emergencia correspondiente en el panel de control. El sistema quedaba en estado de espera, tal y como fue programado, y no se reanudaba hasta recibir una señal de desbloqueo. Este comportamiento demuestra la correcta implementación de una lógica de seguridad básica.

8.3 Pruebas de verificación de las nuevas funciones implementadas

Se realizaron pruebas para verificar el correcto funcionamiento de las nuevas funciones de seguridad implementadas. Estas garantizan la vida útil de las bombas evitando que trabajen en vacío. Se implementaron dos restricciones:

- Una que impedía que la planta realizara descargas a los depósitos de ventas y fugas si el depósito de almacenamiento se encontraba por debajo de un volumen mínimo de seguridad previamente establecido y solo permitía realizar recargas en el depósito de descargas.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

- Otra que garantiza tener un volumen de agua controlado evitando posibles inundaciones estableciendo un volumen máximo de seguridad en el depósito de almacenamiento, el cual en caso de ser alcanzado impide que la planta pueda realizar recargas y solo pueda realizar descargas en los depósitos inferiores.

Se verificó el desempeño de dichas funciones de seguridad provocando en la planta situaciones en los que se alcanzaba los volúmenes de seguridad máximo y mínimo.

Adicionalmente, se comprobó el correcto funcionamiento en los depósitos de ventas y descargas, eliminando posibles problemas de desbordamientos.

8.4 Ensayos de resistencia prolongada

Para verificar el funcionamiento continuo del sistema, se programaron ensayos de resistencia de hasta 4 horas de duración, durante los cuales la planta ejecutó su ciclo completo de dispensación, recarga y fuga de forma ininterrumpida y sin supervisión directa.

Durante las pruebas de resistencia prolongada, se ejecutaron sesiones de 4 horas de duración en las que la planta operó de forma autónoma. En estas pruebas se realizaron ajustes sistemáticos a los tiempos de dispensación y volúmenes transferidos para simular distintos escenarios de carga. Esta variabilidad permitió validar la estabilidad del sistema en condiciones dinámicas, emulando el comportamiento irregular y cambiante de una estación de servicio real.

En el Anexo 11, correspondiente a la generación de datos, se documenta una prueba de funcionamiento continuo de una hora de duración, en la cual se configuró el sistema de depuración (Debug) para simular un día completo de operación de una estación de servicio cada 20 segundos reales. Al finalizar cada día simulado, el sistema enviaba por el puerto serie los siguientes datos:

- Volumen restante en el depósito de almacenamiento
- Volumen acumulado en el depósito de fugas
- Número total de ventas realizadas por los depósitos de Ventas 1 y Ventas 2
- Volumen acumulado vendido por Ventas 1 y Ventas 2
- Número de recargas realizadas
- Volumen total recargado al sistema

Dado que el experimento se prolongó durante una hora, se generaron 180 líneas de registro (una por cada 20 segundos), lo que equivale a aproximadamente seis meses de funcionamiento continuo de una estación de servicio real. Esta equivalencia permite validar la robustez del sistema en escenarios prolongados y además proporciona un dataset de utilidad para pruebas de algoritmos de detección de fugas.

Estos ensayos prolongados demostraron la robustez del sistema ante el uso continuo, sin fallos en la lógica de control, sensores ni alimentación.

Durante estos ensayos no se observaron fallos: no hubo reinicios, la planta mantuvo un comportamiento estable, y los sensores conservaron lecturas coherentes. La prueba demostró que el sistema es robusto ante uso intensivo, validando tanto el diseño lógico como la integración del hardware.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

8.5 Generación de datasets para futuras investigaciones

Uno de los objetivos clave de este proyecto es utilizar la planta como plataforma para la generación de datasets realistas que permitan validar algoritmos de detección de fugas. Para ello, durante los ensayos de resistencia se utilizó un sistema de registro que almacenaba de forma continua variables como pesos de los depósitos, tiempos entre eventos, volúmenes de dispensación y estados del sistema.

Los datos se volcaban a un archivo llamado “debug.txt” el cual se generaba desde un script de python que tomaba los datos directamente desde el puerto de comunicación serial. Estos datos constituyen la base para el entrenamiento y validación de algoritmos de detección de fugas con los que incluso se podrán aplicar algoritmos de aprendizaje automático. Gracias a la variabilidad aleatoria introducida en los ensayos (modificando frecuencias, volúmenes y condiciones iniciales), el dataset resultante presenta una diversidad de escenarios que simulan de forma fidedigna el comportamiento de una instalación real con posibles pérdidas.

Esta capacidad de exportación de datos y personalización convierte al prototipo no solo en una planta de simulación funcional, sino también en una herramienta útil para investigación aplicada en sistemas embebidos y automatización industrial.

Como parte de la documentación de la validación, se grabó un vídeo del sistema en funcionamiento prolongado, disponible en el repositorio del proyecto [8].

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

9. Conclusiones

La ejecución de este Trabajo Fin de Grado ha permitido alcanzar con éxito los objetivos planteados: se ha logrado restablecer el funcionamiento completo de una planta automatizada heredada, resolviendo los fallos tanto físicos como lógicos que impedían su operatividad, y dejándola preparada para futuras líneas de investigación, como la implementación de algoritmos de detección de fugas.

Desde el punto de vista técnico, los aportes han sido significativos. Se ha mejorado sustancialmente la robustez del código, corrigiendo errores en fugas, gestión de la serial y condiciones límite en depósitos. A nivel físico, se han estabilizado las lecturas de los sensores HX711, mejorado la alimentación eléctrica con fuentes adecuadas, y mitigando el ruido electromagnético mediante recableado y apantallamiento. Finalmente, se ha llevado a cabo el montaje definitivo del sistema, incluyendo la integración de una caja eléctrica con carriles DIN, bornas y protecciones, lo que permite una operación prolongada, segura y mantenible.

El proceso ha sido también una oportunidad formativa valiosa. A lo largo del proyecto se han desarrollado habilidades clave como la documentación técnica, el trabajo en equipo coordinado, y la depuración de sistemas complejos en un entorno real. La experiencia adquirida constituye una base sólida para enfrentar futuros retos en el ámbito de la automatización industrial y los sistemas embebidos.

Pese a los logros, se identifican algunas limitaciones: no se pudo incorporar la báscula del depósito de descargas por fallo del hardware y falta de tiempo, y no se llegó a validar de forma conjunta el sistema SCADA con la planta ya operativa.

En su estado actual, la planta se considera plenamente funcional para su uso en contextos académicos, ya sea en prácticas de automatización, desarrollos de investigación, o en tareas específicas de detección de fugas, que constituyen el objetivo principal de este prototipo. La documentación elaborada y la estructura final del sistema facilitan su mantenibilidad y comprensión por parte de terceros, permitiendo su reutilización en futuros trabajos.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

10. Conclusions

The execution of this Final Degree Project has successfully achieved the established objectives: the full operation of an inherited automated plant has been restored by resolving both physical and logical failures that previously prevented its functionality, leaving it prepared for future research lines, such as the implementation of leak detection algorithms.

From a technical standpoint, the contributions have been significant. The robustness of the code has been substantially improved, correcting errors related to leak simulation, serial communication handling, and boundary conditions in the tanks. On the physical side, sensor readings from the HX711 modules have been stabilized, power supply issues resolved through the use of appropriate power sources, and electromagnetic noise mitigated by means of recabling and shielding. Finally, the definitive physical assembly of the system has been completed, including the integration of an electrical enclosure with DIN rails, terminal blocks, and protection elements, enabling prolonged, safe, and maintainable operation.

The process has also been a valuable learning opportunity. Throughout the project, key skills were developed, including technical documentation, coordinated teamwork, and debugging of complex systems in a real world environment. The experience gained provides a solid foundation to face future challenges in industrial automation and embedded systems.

Despite these achievements, some limitations were identified: the load cell for the upper discharge tank could not be integrated due to hardware failure and time constraints, and the SCADA system could not be jointly validated with the now fully operational plant.

In its current state, the plant is considered fully functional for academic use whether in automation training, research developments, or specific leak detection tasks, which constitute the primary purpose of this prototype. The documentation produced and the final structure of the system facilitate its maintainability and understanding by third parties, enabling its reuse in future academic or research projects.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

11. Líneas futuras

A partir del trabajo realizado y del estado actual de la planta, se identifican varias líneas de mejora que podrían desarrollarse en proyectos futuros para aumentar su funcionalidad, fiabilidad y valor como herramienta académica.

1. Incorporación de una báscula en el depósito de Descargas

Aunque inicialmente se contemplaba su implementación, la báscula destinada al tanque de Descargas no pudo instalarse debido a un fallo en el sensor. Para su integración futura, se propone el uso de una báscula robusta de tipo doméstico (para pesaje humano), con capacidad adecuada y buena resolución. Su incorporación permitiría conocer en todo momento la cantidad de líquido disponible para iniciar nuevas simulaciones, optimizando así la dinámica del sistema.

2. Implementación de un sistema de filtrado de agua

Durante el desarrollo del proyecto se detectaron problemas derivados de la suciedad acumulada en el circuito, que obstruía válvulas y comprometía el funcionamiento de la bomba peristáltica. Como mejora, se propone la instalación de un filtro de malla reutilizable en la entrada de la bomba de retorno. Esta medida permitiría eliminar partículas sólidas antes de su recirculación, alargando la vida útil de los componentes y reduciendo la necesidad de mantenimiento.

3. Tratamiento básico del agua

Otra línea viable es la incorporación de un sistema simple de tratamiento del agua para evitar la proliferación de microorganismos y sedimentos. Se plantea el uso de pequeñas dosis de productos desinfectantes, como el cloro, para mantener las condiciones higiénicas del sistema sin recurrir al uso continuo de agua destilada, cuya adquisición resulta menos viable económicamente.

4. Independización del panel de control

Actualmente, el panel de control físico está conectado mediante múltiples líneas a la unidad central, lo que incrementa el riesgo de ruido y fallos. Como línea de mejora, se propone dotar al panel de un Arduino independiente encargado exclusivamente de gestionar sus entradas y salidas, y comunicarse con el controlador principal. Idealmente, dicha comunicación se realizaría de forma inalámbrica, reduciendo así la complejidad del cableado y facilitando el mantenimiento.

5. Validación del sistema SCADA

Otra mejora relevante sería la comprobación del sistema SCADA desarrollado en el TFM de Alexander [7]. Si bien dicho sistema ya fue diseñado y documentado, aún no se ha probado su funcionamiento en conjunto con la planta estabilizada. Esta integración permitiría una monitorización avanzada, con registro de datos y control remoto, elevando el valor académico del prototipo.

6. Mejoras estructurales y de mantenimiento

Finalmente, se contempla como línea de mejora la adaptación de la planta para su uso como laboratorio demostrativo de carácter permanente. Esto incluiría la propuesta de mecanismos para facilitar el drenaje y la limpieza periódica de los depósitos. Aunque no se ha planteado un sistema de autolimpieza, su desarrollo futuro podría suponer una gran ventaja en cuanto a mantenimiento.

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Asimismo, se considera necesario revisar y mejorar el sistema de unión de las tuberías. Actualmente, muchas de las conexiones se realizan mediante teflón aplicado manualmente, lo cual ha demostrado ser insuficiente en algunos casos, provocando pequeñas fugas en zonas críticas. Como mejora estructural, se recomienda sustituir estas uniones por racores más robustos o sistemas de conexión estanca que garanticen una mayor durabilidad y seguridad en el tiempo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

12. Resumen de actuaciones y dedicación horaria

Con el fin de facilitar la valoración del trabajo realizado y justificar el apartado de costes humanos recogido en el presupuesto, a continuación se muestra un resumen estructurado de las principales tareas desarrolladas a lo largo del proyecto, junto con una estimación de las horas de trabajo invertidas en cada una de ellas.

Esta tabla refleja tanto las actuaciones técnicas como las actividades de documentación, diseño y planificación, y pretende representar de forma realista el reparto de esfuerzos durante la ejecución del TFG.

Objetivo o tarea	Actuaciones realizadas	Horas estimadas
Validación cruzada con el código original	Lectura, análisis y comprensión del proyecto heredado para localizar errores lógicos o estructurales	10
Diagnóstico y reparación de fugas hidráulicas	Identificación y sellado de fugas en tuberías, válvulas y uniones	35
Limpieza del sistema y retirada de residuos	Vaciado de depósitos, eliminación de suciedad y sedimentos transportados por la bomba	27
Revisión y rediseño del cableado	Sustitución de cables, soldaduras, apantallamiento y reubicación de líneas sensibles	40
Planificación y preparación del montaje final	Incluyó el diseño físico de la distribución final, elaboración de esquemas para profesores, planificación de conexiones, compra de materiales, análisis de compatibilidad entre componentes y organización previa al ensamblaje.	22
Reestructuración eléctrica final	Armando de armario con carriles DIN, cajas estancas, bornas y conexiónado completo según normativas	50
Calibración de básculas y validación	Ajuste de coeficientes tras soldaduras, pruebas funcionales independientes de cada sensor	25
Diagnóstico y depuración del software	Análisis de máquinas de estados, reescritura de funciones, tratamiento de errores de caudal, volumen y fugas	70
Pruebas de verificación funcional y emergencia	Ensayos guiados en todos los estados del sistema, simulación de eventos anómalos, depuración con logs	80
Validación prolongada y generación de datasets	Simulaciones de hasta 4 h, con parámetros variables de dispensación y registro para análisis posterior	35
Impresión 3D de soportes	Diseño, modificación, calibración e integración de 6 soportes para carril DIN	20
Reparaciones de componentes físicos	Sustitución de potenciómetro defectuoso, sensores HX711, relés y otros elementos	20
Documentación técnica y esquemas eléctricos	Diagramas en AutoCAD, croquis de bornas, documentación de conexiones	35
Redacción de memoria y anexos	Estructuración, redacción técnica, referencias cruzadas, revisión por entregas	85

37

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Planificación y coordinación	Reuniones semanales, reparto de tareas	10
Desarrollo de funciones PrintMensaje() y PrintNúmero()	Implementación de buffer, filtrado de mensajes repetidos, depuración serial limpia	10
Mejora de robustez ante ruido e interferencias	Separación física de líneas, uso de condensadores y fuentes independientes	14
Preparación del repositorio de código y documentación online	Organización del código fuente, generación de documentación mínima para futuras implementaciones	7
Fotografía y elaboración de imágenes de memoria	Toma de imágenes, edición y preparación de figuras de memoria técnica y esquemas	5
	TOTAL	600

Tabla 2: Horas estimadas y actuaciones realizadas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

13. Presupuesto

La tabla 3 presenta la estimación económica global del proyecto, incluyendo todas las partidas relevantes para una ejecución realista. Se contemplan tanto los materiales empleados como los costes asociados a la mano de obra, a los márgenes industriales y a los gastos indirectos. Asimismo, se incluyen los impuestos aplicables, con el objetivo de ofrecer una visión completa del coste final del desarrollo.

Concepto	Unidades	Precio / unidad	Precio
Material			
Caja industrial policarbonato IP66	6,00	21,11	126,66
Armario policarbonato 500x400x200 IP66	1,00	292,90	292,90
Tubo PVC d25	3,00	3,45	10,35
Carril DIN para cuadro	1,00	11,26	11,26
Metro pletina de aluminio	1,00	5,99	5,99
Canal gris 42x30	2,00	5,88	11,76
Magnenotermico 1P 10A Miniature	1,00	65,88	65,88
Diferencial 2P 25A	1,00	67,69	67,69
Canal 40 x 160 mts.	2,00	43,32	86,64
Tapa final canaleta	3,00	5,78	17,34
Cable apantallado 4x1 mm ² libre de halogenos	10,00	2,18	21,80
Cable 2 x 1 mm negro y rojo	5,00	0,89	4,45
Tornillería pequeña	32,00	0,35	11,20
Tornillería 0,6 y 0,8 mm	12,00	0,80	9,60
Mano de obra			
Hora de ingeniería	600,00	45,00	27000,00
		PEM	27743,52
		BI	3606,6576
		CI	1387,176
		Total sin IGIC (7%)	32737,35
		Total	35028,97

Tabla 3: Presupuesto del proyecto

14. Bibliografía

- [1] Sierra Club, “Leaking Underground Storage Tanks: A Threat to Public Health & Environment,” Estados Unidos, Reporte, 2006. Disponible en: <https://www.cse.org/cerc/documents/LUSTThreattoPublicHealth.pdf>
- [2] L. Arriaga Campos, “Diseño e implementación de un sistema autónomo para la simulación de fugas en depósitos”, Tesis de Grado, Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, Univ. de La Laguna, España, 2020. Disponible: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/20640>
- [3] N. Yanes Pérez, “Diseño e implementación de un sistema autónomo para la detección de fugas en depósitos”, Trabajo Final de Máster, Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Univ. de La Laguna, España, 2022. Disponible en: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/31568>
- [4] E. Gastón Quesada, “Prototipo de bajo coste para la simulación de fugas en depósitos de una estación de servicio con fines docentes y de investigación”, Tesis de Grado, Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, Univ. de La Laguna, España, 2022.
- [5] F. Rodríguez Herrera, “Simulación y detección de fugas en depósitos de combustible”, Tesis de Grado, Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, Univ. de La Laguna, España, 2022. Disponible: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/30329>
- [6] G. Medina León, “Detección de fugas en depósitos de combustible”, Repositorio de GitHub, 2023. Disponible en: <https://github.com/GregorioML/TFG-DetencionFugas>
- [7] A. Corona Ledesma, “Diseño e implementación de un sistema SCADA para un prototipo físico para la simulación y detección de fugas en depósitos de combustible”, Trabajo Final de Máster, Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Univ. de La Laguna, España, 2024. Disponible en: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/39096>
- [8] R. Lorenzo Parrado y D. Díaz Perdomo, “Detección de Fugas”, Repositorio de GitHub, Julio 2025, Disponible en: <https://github.com/Rxxllnz/TFG-Detencion-Fugas-2025>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/</i>	
Identificador del documento: 7763533	Código de verificación: r8bJ2+NN
Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Anexos

41

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Índice Anexos

Anexos	41
1. Modelos 3D	43
1.1 Montura Arduino Mega	44
1.2 Montura Relés	44
2. Esquema cuadro eléctrico	45
3. Módulos HX711	46
3.1 Ventas 1	47
3.2 Ventas 2	47
3.3 Fugas	48
3.4 Almacenamiento	48
3.5 Descargas	49
4. Sensores de nivel	50
5. L298N	50
6. Módulo de relés	51
7. Regulador de 5V	52
8. Arduino	53
9. Conexión de las bornas	54
10. Montaje en 3D	55
10.1 Montaje final	56
10.2 Disposición canaletas y armario	57
10.3 Disposición cajas estancas y tuberías (Estante inferior,vista trasera)	58
10.4 Disposición cajas estancas y tuberías (Estante central, vista delantera)	58
10.5 Disposición cajas estancas y tuberías (Estante superior, vista trasera)	59
11. Salida de Debug en prueba de simulación extendida	60

42

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

1. Modelos 3D

43

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

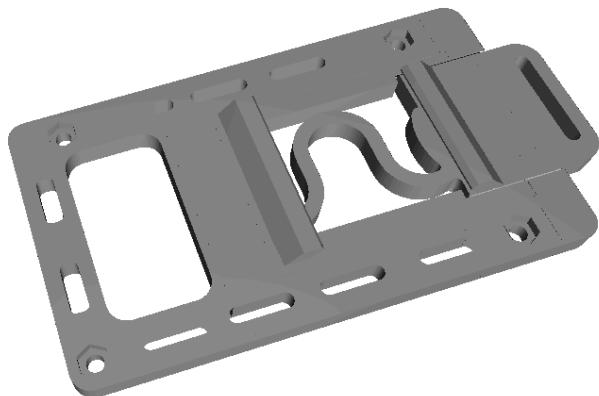
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

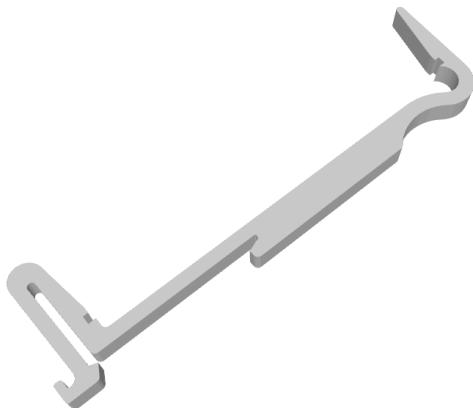
DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

1.1 Montura Arduino Mega



1.2 Montura Relés



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

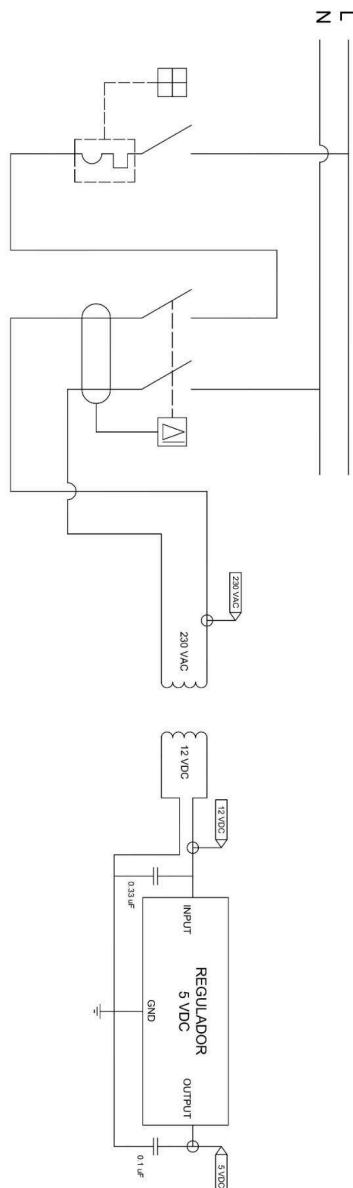
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

2. Esquema cuadro eléctrico



45

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bj2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 10/07/2025 16:00:35

DIMAS DÍAZ PERDOMO
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10/07/2025 16:02:05

Pedro Antonio Toledo Delgado
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10/07/2025 17:11:51

3. Módulos HX711

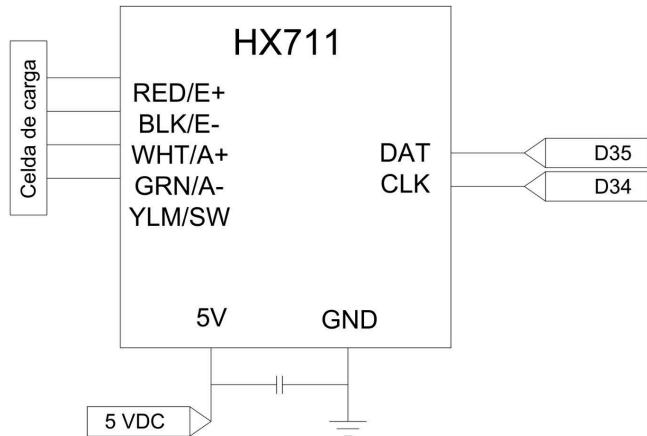
46

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

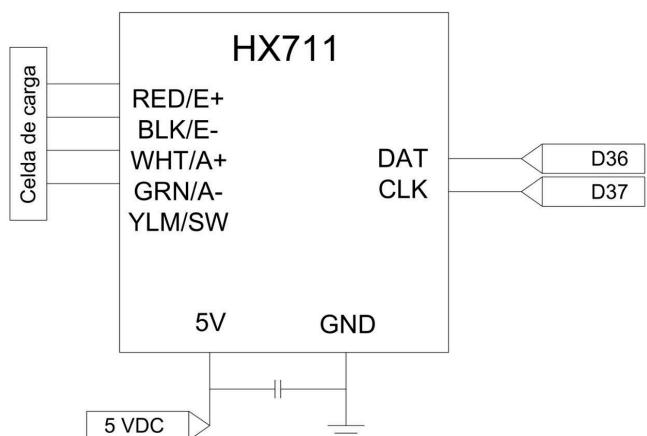
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

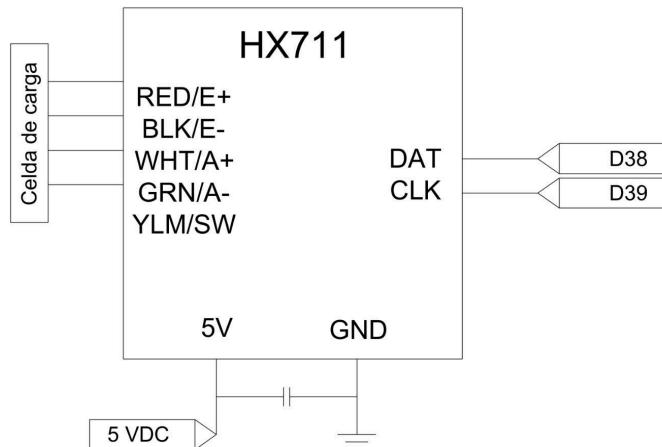
3.1 Ventas 1



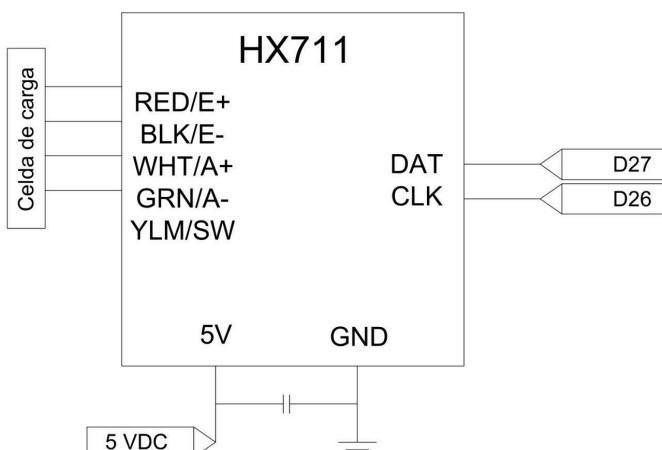
3.2 Ventas 2



3.3 Fugas



3.4 Almacenamiento



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

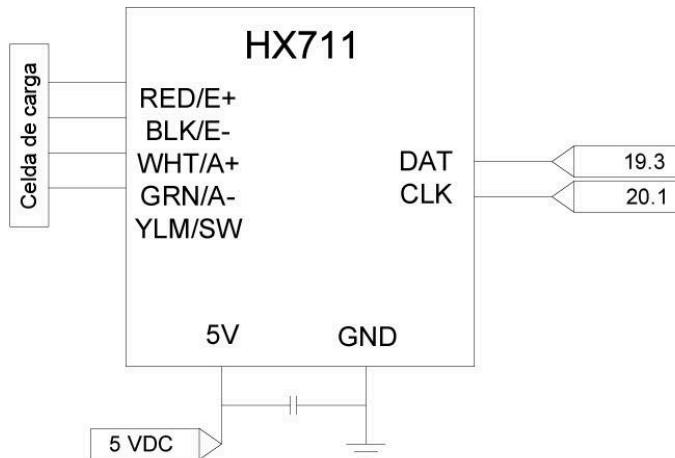
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

3.5 Descargas



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

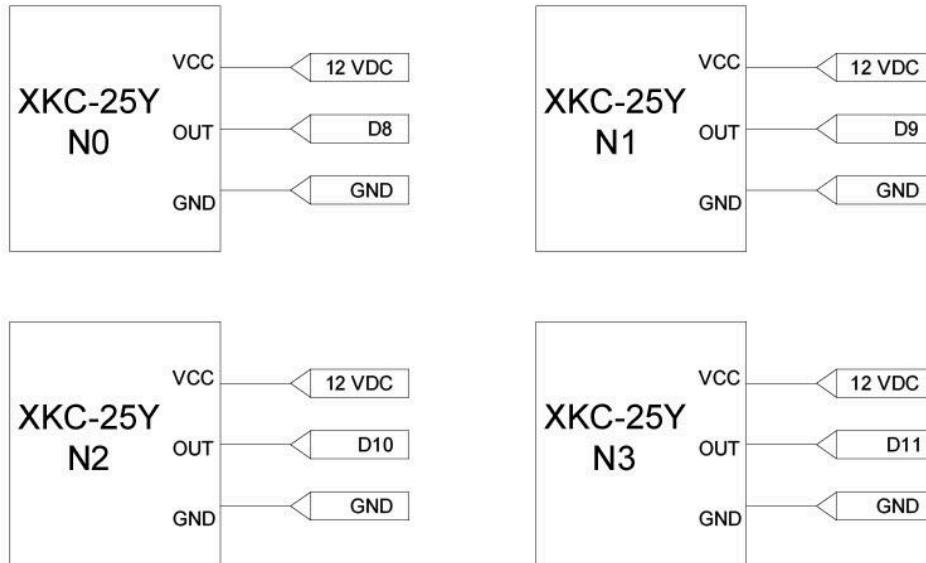
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

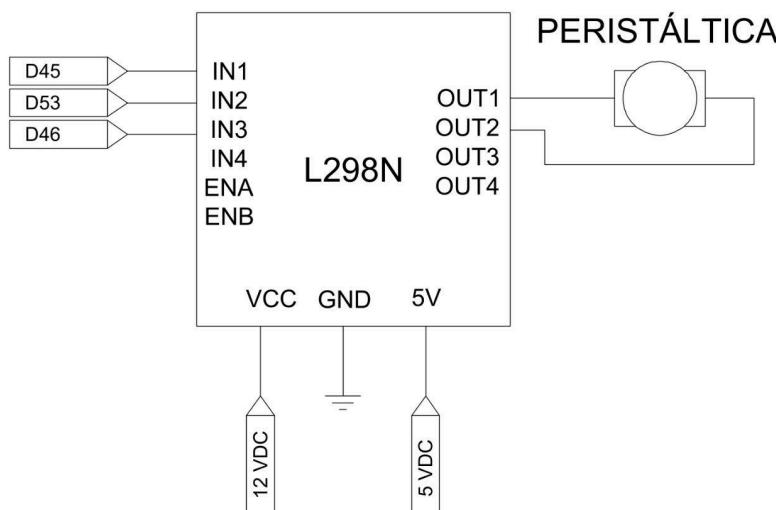
DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

4. Sensores de nivel



5. L298N



50

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bj2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 10/07/2025 16:00:35

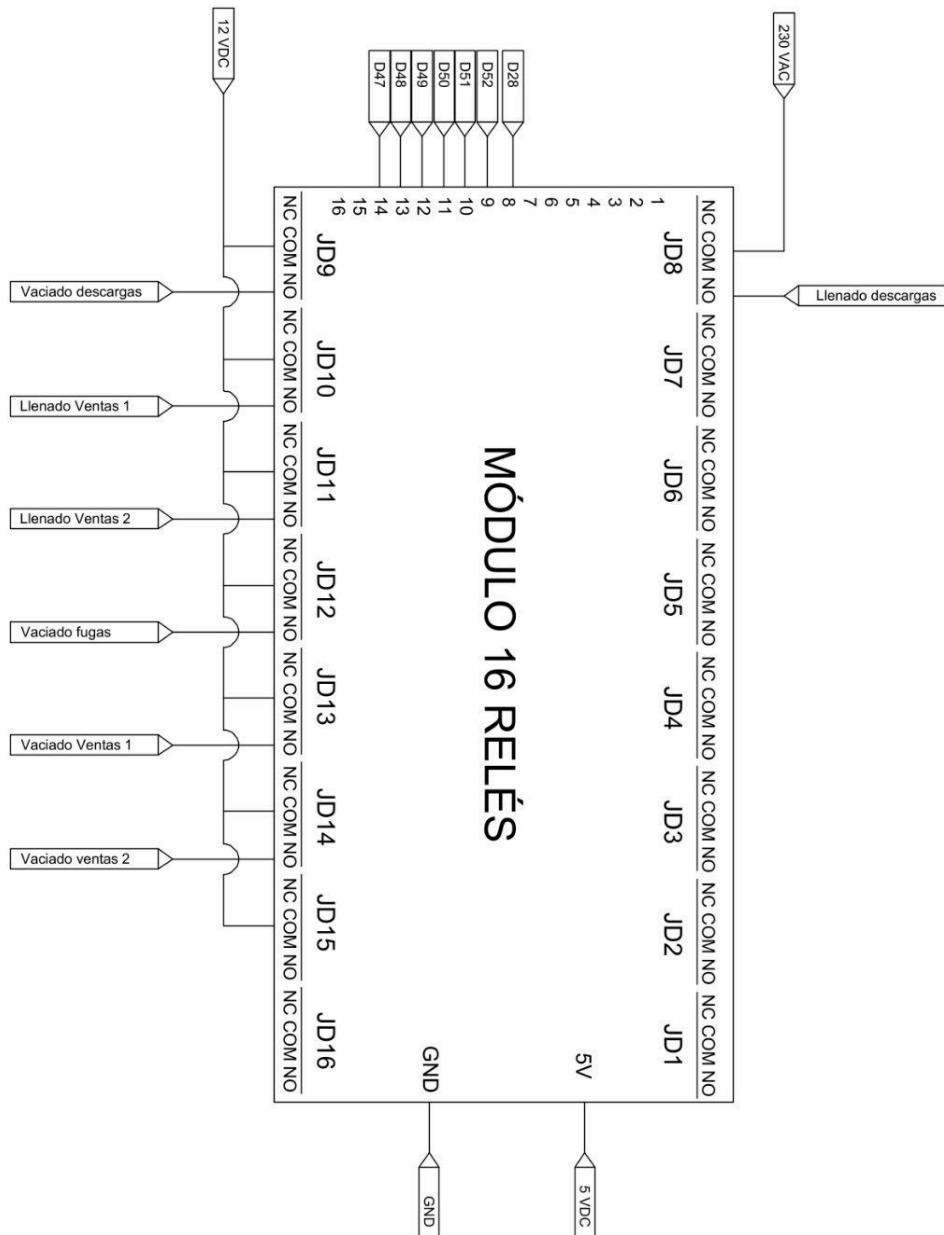
DIMAS DÍAZ PERDOMO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10/07/2025 16:02:05

Pedro Antonio Toledo Delgado
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10/07/2025 17:11:51

6. Módulo de relés



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

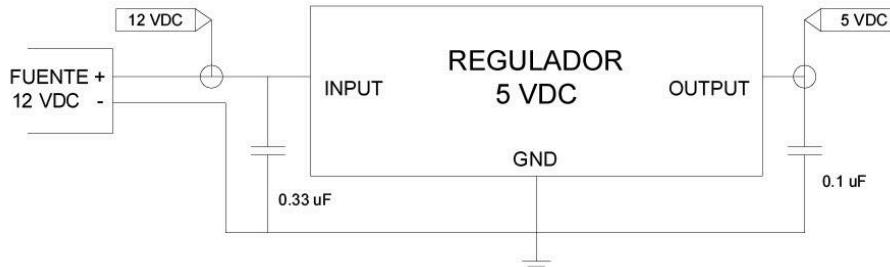
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO 10/07/2025 16:02:05
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado 10/07/2025 17:11:51
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

7. Regulador de 5V



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

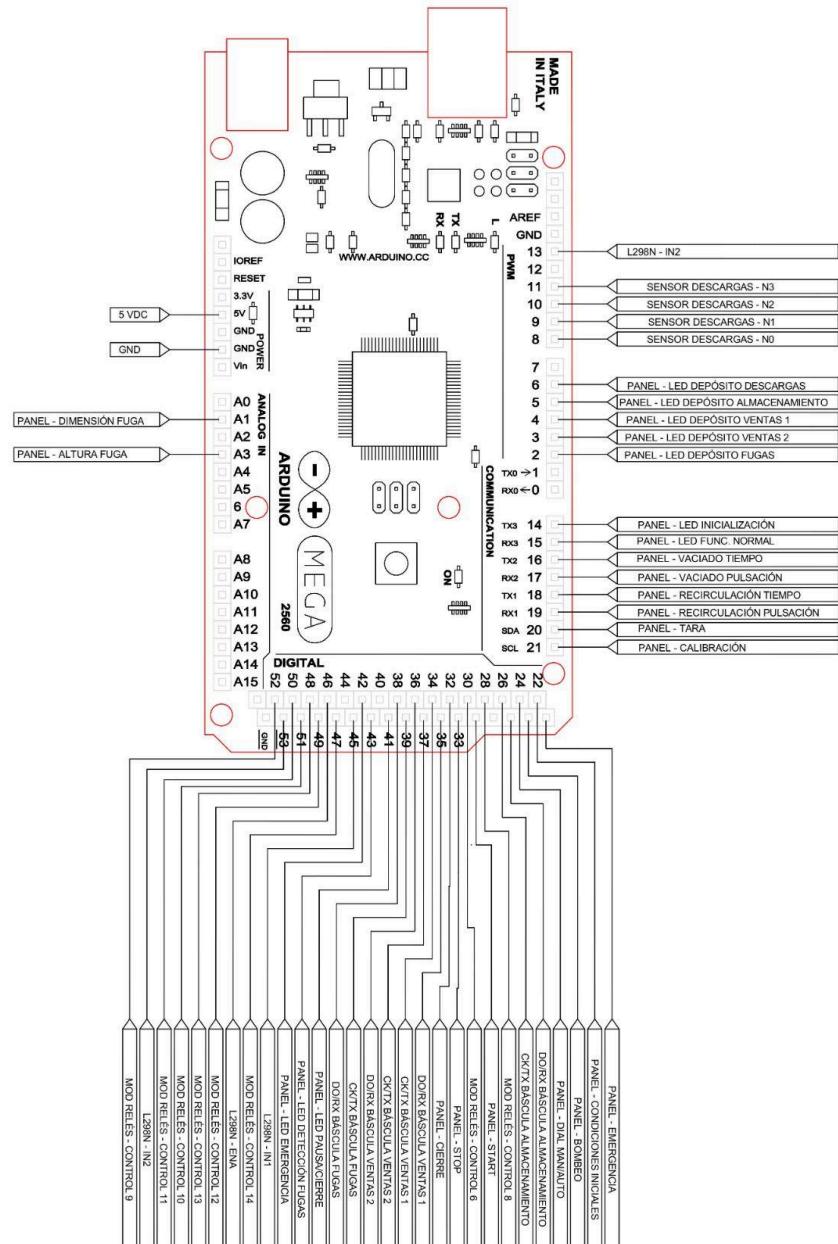
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

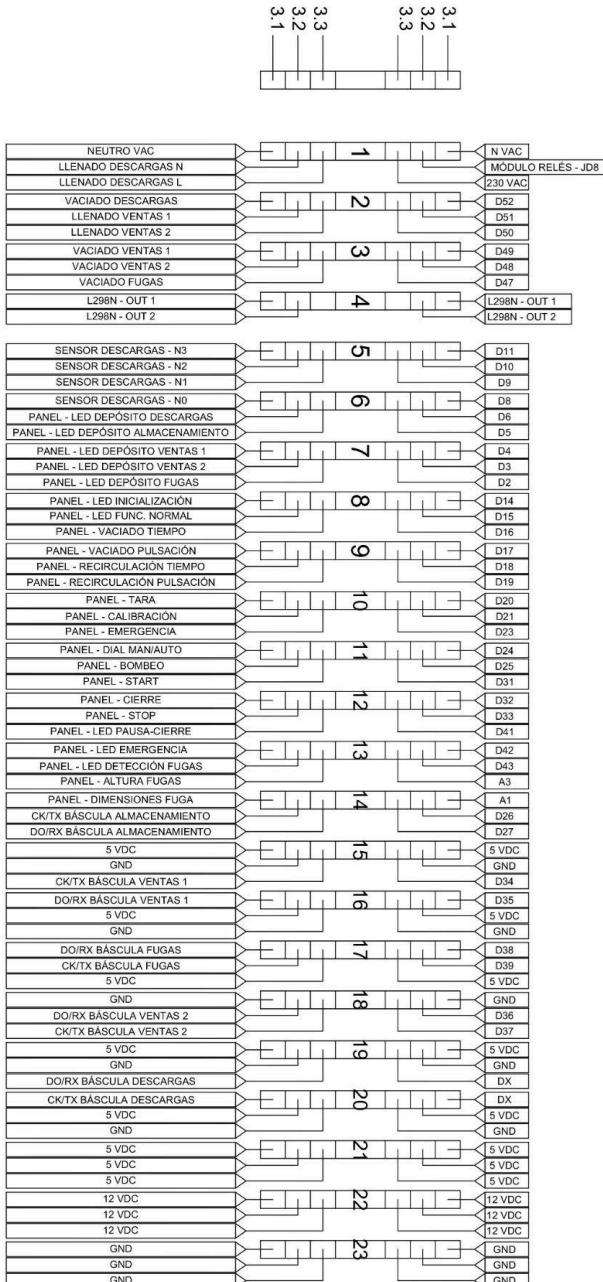
8. Arduino



53

<p>Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. <i>Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/</i></p>
<p>Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN</p>
<p>Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</p>
<p>Fecha 10/07/2025 16:00:35</p>
<p>DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</p>
<p>10/07/2025 16:02:05</p>
<p>Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA</p>
<p>10/07/2025 17:11:51</p>

9. Conexión de las bornas



54

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8b1J

ENZO PARRADO

Firmado por: RAUL LORENZO PARRADO
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha 10/07/2025 16:00:35

10/07/2025 17:11:51

10. Montaje en 3D

55

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

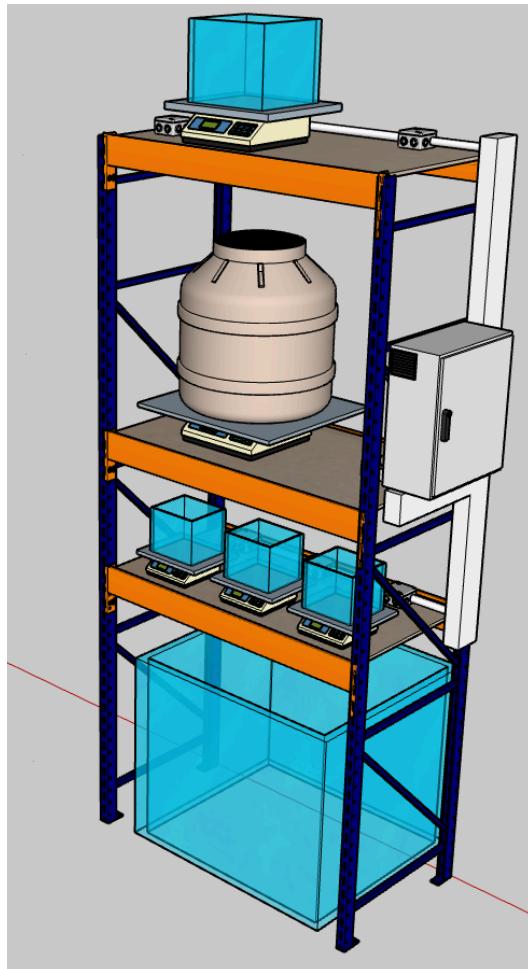
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10.1 Montaje final



56

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

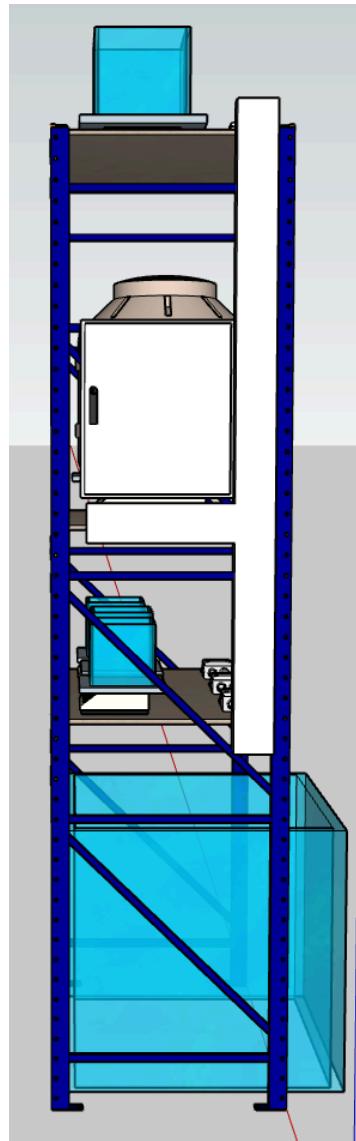
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

10.2 Disposición canaletas y armario



57

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

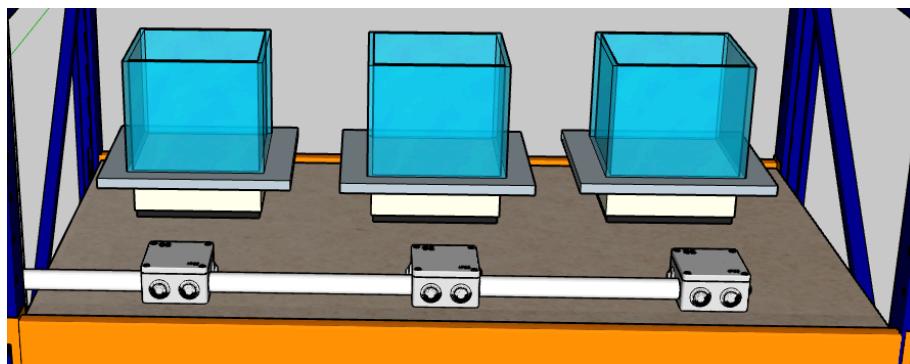
Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

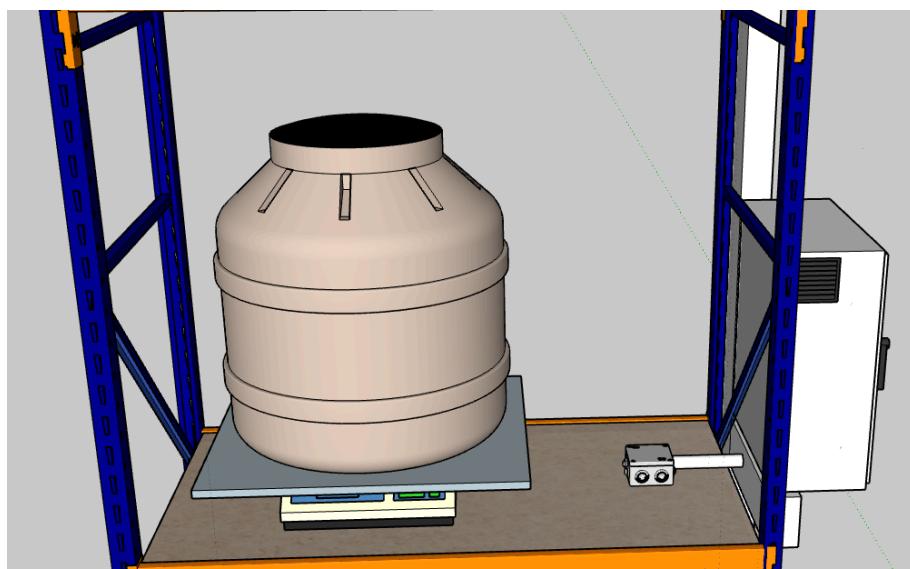
DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

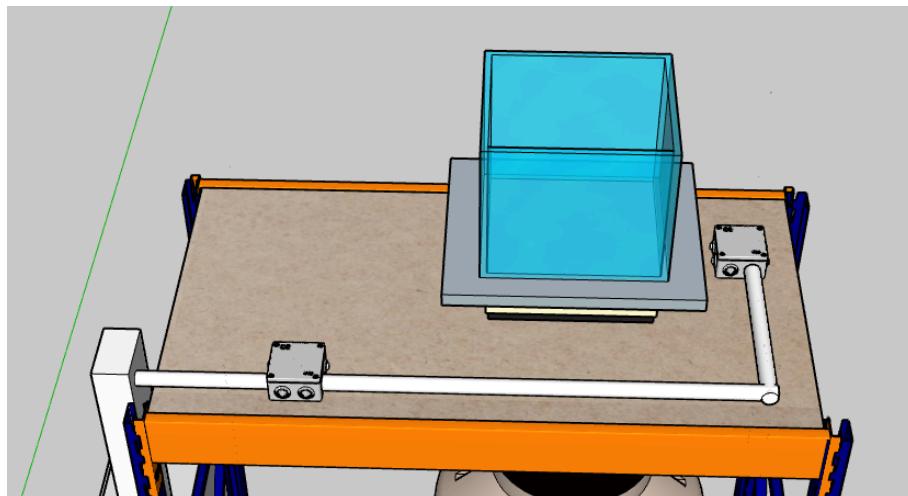
10.3 Disposición cajas estancas y tuberías (Estante inferior,vista trasera)



10.4 Disposición cajas estancas y tuberías (Estante central, vista delantera)



10.5 Disposición cajas estancas y tuberías (Estante superior, vista trasera)



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bj2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO Fecha 10/07/2025 16:00:35
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

DIMAS DÍAZ PERDOMO Fecha 10/07/2025 16:02:05
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Pedro Antonio Toledo Delgado Fecha 10/07/2025 17:11:51
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

11. Salida de Debug en prueba de simulación extendida

El siguiente bloque recoge íntegramente los datos generados por el sistema durante una prueba de funcionamiento continuo de 60 minutos. En esta prueba, el sistema fue configurado para simular un ciclo completo de operación de una estación de servicio cada 20 segundos. Las líneas muestran los valores registrados en tiempo real por el sistema de depuración, incluyendo recargas, ventas, volumen acumulado y detección de fugas.

Este log fue usado para comprobar el funcionamiento robusto del sistema en condiciones prolongadas, así como para futuras tareas de análisis y generación de datasets.

```
Debug - Datalogging:55.40,1,5.00,0,0.00,0,0.00,-0.00
Debug - Datalogging:28.79,0,5.00,1,0.50,1,0.76,0.00
Debug - Datalogging:26.88,1,10.00,1,1.47,1,1.70,0.01
Debug - Datalogging:26.68,1,15.00,0,1.47,0,1.70,0.01
Debug - Datalogging:25.31,0,15.00,1,2.00,1,2.16,0.02
Debug - Datalogging:24.58,0,15.00,1,2.42,0,2.16,0.02
Debug - Datalogging:23.37,0,15.00,0,2.42,1,2.68,0.02
Debug - Datalogging:22.25,0,15.00,1,3.15,1,3.06,0.03
Debug - Datalogging:20.78,0,15.00,1,3.80,1,3.45,0.03
Debug - Datalogging:20.02,0,15.00,1,4.20,0,3.45,0.04
Debug - Datalogging:19.24,0,15.00,0,4.20,1,4.02,0.04
Debug - Datalogging:18.54,0,15.00,1,4.57,0,4.02,0.04
Debug - Datalogging:17.13,0,15.00,1,5.44,1,4.35,0.05
Debug - Datalogging:16.33,0,15.00,0,5.44,1,4.71,0.05
Debug - Datalogging:14.73,0,15.00,1,5.97,1,5.32,0.06
Debug - Datalogging:16.56,1,35.00,1,6.62,0,5.32,0.06
Debug - Datalogging:18.77,0,35.00,0,6.62,1,5.86,0.06
Debug - Datalogging:21.15,0,35.00,1,6.95,1,6.27,0.07
Debug - Datalogging:23.54,0,35.00,1,7.29,0,6.27,0.07
Debug - Datalogging:22.83,0,35.00,1,7.64,1,6.78,0.08
Debug - Datalogging:21.04,0,35.00,1,8.64,1,7.31,0.08
Debug - Datalogging:20.11,0,35.00,0,8.64,1,8.13,0.08
Debug - Datalogging:18.70,0,35.00,1,9.63,0,8.13,0.09
Debug - Datalogging:17.49,0,35.00,1,10.05,1,8.46,0.09
Debug - Datalogging:16.24,0,35.00,0,10.05,1,9.39,0.10
Debug - Datalogging:15.56,0,35.00,1,10.56,0,9.39,0.10
Debug - Datalogging:13.29,0,35.00,1,11.40,1,10.40,0.10
Debug - Datalogging:12.48,0,35.00,0,11.40,1,10.94,0.11
Debug - Datalogging:11.33,0,35.00,1,12.27,0,10.94,0.11
Debug - Datalogging:10.94,1,55.00,1,12.96,1,11.86,0.12
Debug - Datalogging:13.15,0,55.00,1,13.84,0,11.86,0.12
Debug - Datalogging:15.56,0,55.00,0,13.84,1,12.65,0.12
Debug - Datalogging:17.27,0,55.00,1,14.18,1,13.49,0.13
Debug - Datalogging:16.98,0,55.00,1,15.01,0,13.49,0.13
Debug - Datalogging:15.87,0,55.00,0,15.01,1,14.26,0.14
Debug - Datalogging:14.91,0,55.00,1,15.77,1,14.81,0.14
Debug - Datalogging:13.93,0,55.00,1,16.29,0,14.81,0.14
```

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Debug - Datalogging:12.86,0,55.00,1,16.68,1,15.20,0.15
Debug - Datalogging:12.09,0,55.00,0,16.68,1,15.73,0.15
Debug - Datalogging:10.58,0,55.00,1,17.17,1,16.31,0.16
Debug - Datalogging:9.69,0,55.00,1,17.73,0,16.31,0.16
Debug - Datalogging:8.76,0,55.00,0,17.73,1,17.06,0.17
Debug - Datalogging:6.99,0,55.00,1,18.17,1,17.88,0.17
Debug - Datalogging:6.54,1,75.00,1,18.91,0,17.88,0.17
Debug - Datalogging:8.65,0,75.00,1,19.82,1,18.37,0.17
Debug - Datalogging:10.79,0,75.00,0,19.82,1,19.12,0.18
Debug - Datalogging:13.42,0,75.00,1,20.14,0,19.12,0.18
Debug - Datalogging:13.95,0,75.00,1,20.51,1,19.89,0.18
Debug - Datalogging:12.96,0,75.00,0,20.51,1,20.89,0.19
Debug - Datalogging:12.51,1,80.00,1,20.83,0,20.89,0.19
Debug - Datalogging:10.86,0,80.00,1,21.27,1,21.81,0.20
Debug - Datalogging:9.36,0,80.00,1,21.64,0,21.81,0.20
Debug - Datalogging:8.76,0,80.00,0,21.64,1,22.78,0.20
Debug - Datalogging:7.36,0,80.00,1,22.02,1,23.71,0.21
Debug - Datalogging:6.60,0,80.00,1,22.54,0,23.71,0.21
Debug - Datalogging:5.08,0,80.00,1,23.01,1,24.28,0.21
Debug - Datalogging:4.33,0,80.00,0,23.01,1,24.60,0.20
Debug - Datalogging:3.84,0,80.00,1,23.37,0,24.60,0.20
Debug - Datalogging:2.03,0,80.00,1,23.75,1,25.59,0.20
Debug - Datalogging:3.56,1,100.00,0,23.75,0,25.59,0.21
Debug - Datalogging:5.63,0,100.00,1,24.32,1,26.58,0.20
Debug - Datalogging:7.50,0,100.00,1,25.05,1,26.92,0.20
Debug - Datalogging:10.26,0,100.00,0,25.05,0,26.92,0.21
Debug - Datalogging:9.83,0,100.00,1,25.60,1,27.56,0.21
Debug - Datalogging:8.13,0,100.00,1,26.42,1,28.21,0.22
Debug - Datalogging:7.72,0,100.00,0,26.42,0,28.21,0.22
Debug - Datalogging:6.76,0,100.00,1,26.88,1,28.66,0.22
Debug - Datalogging:5.24,0,100.00,1,27.35,1,29.28,0.22
Debug - Datalogging:4.50,0,100.00,0,27.35,1,29.69,0.22
Debug - Datalogging:3.80,0,100.00,1,27.94,0,29.69,0.22
Debug - Datalogging:1.66,0,100.00,1,28.84,1,30.62,0.22
Debug - Datalogging:1.65,0,100.00,0,28.84,0,30.62,0.22
Debug - Datalogging:0.78,1,120.00,1,29.32,1,31.04,0.22
Debug - Datalogging:2.45,0,120.00,1,30.07,1,31.59,0.22
Debug - Datalogging:5.17,0,120.00,0,30.07,0,31.59,0.22
Debug - Datalogging:7.50,0,120.00,1,30.45,1,32.33,0.22
Debug - Datalogging:8.18,0,120.00,1,31.10,1,32.87,0.22
Debug - Datalogging:7.58,0,120.00,0,31.10,1,33.37,0.23
Debug - Datalogging:6.44,0,120.00,1,31.92,0,33.37,0.23
Debug - Datalogging:4.96,0,120.00,0,31.92,1,34.37,0.23
Debug - Datalogging:3.43,0,120.00,1,32.85,1,34.97,0.23
Debug - Datalogging:2.38,0,120.00,1,33.65,0,34.97,0.23
Debug - Datalogging:0.93,0,120.00,1,34.28,1,35.33,0.23
Debug - Datalogging:0.90,0,120.00,0,34.28,0,35.33,0.23
Debug - Datalogging:0.11,0,120.00,1,34.83,0,35.33,0.23
Debug - Datalogging:0.12,0,120.00,0,34.83,0,35.33,0.22
Debug - Datalogging:1.13,1,140.00,1,35.37,1,36.24,0.22
Debug - Datalogging:4.17,0,140.00,0,35.37,0,36.24,0.22
Debug - Datalogging:6.23,0,140.00,1,36.12,1,36.55,0.22

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Debug - Datalogging:7.93,0,140.00,1,36.55,1,37.15,0.22
Debug - Datalogging:7.54,0,140.00,1,36.91,0,37.15,0.22
Debug - Datalogging:6.94,1,145.00,0,36.91,1,37.69,0.22
Debug - Datalogging:5.76,1,150.00,1,37.56,1,38.02,0.22
Debug - Datalogging:4.49,0,150.00,1,38.00,0,38.02,0.22
Debug - Datalogging:3.39,1,155.00,1,38.54,1,38.94,0.22
Debug - Datalogging:1.73,0,155.00,1,39.10,1,39.70,0.22
Debug - Datalogging:1.56,0,155.00,0,39.10,0,39.70,0.22
Debug - Datalogging:-0.03,0,155.00,1,39.84,1,40.12,0.22
Debug - Datalogging:-0.02,0,155.00,0,39.84,0,40.12,0.22
Debug - Datalogging:-0.00,0,155.00,0,39.84,0,40.12,0.22
Debug - Datalogging:0.03,0,155.00,0,39.84,0,40.12,0.22
Debug - Datalogging:0.05,0,155.00,0,39.84,0,40.12,0.22
Debug - Datalogging:0.86,1,175.00,0,39.84,0,40.12,0.22
Debug - Datalogging:2.23,0,175.00,1,40.64,1,40.79,0.22
Debug - Datalogging:4.00,0,175.00,0,40.64,1,41.32,0.22
Debug - Datalogging:7.12,0,175.00,1,41.57,0,41.32,0.22
Debug - Datalogging:7.25,0,175.00,1,42.50,1,41.75,0.22
Debug - Datalogging:6.42,0,175.00,0,42.50,1,42.20,0.22
Debug - Datalogging:5.46,0,175.00,1,43.14,0,42.20,0.22
Debug - Datalogging:4.41,0,175.00,1,43.55,1,42.95,0.22
Debug - Datalogging:2.78,0,175.00,1,44.40,1,43.30,0.22
Debug - Datalogging:2.09,0,175.00,0,44.40,1,43.83,0.22
Debug - Datalogging:0.99,0,175.00,1,45.18,0,43.83,0.22
Debug - Datalogging:0.13,0,175.00,0,45.18,1,44.53,0.22
Debug - Datalogging:0.14,0,175.00,0,45.18,0,44.53,0.22
Debug - Datalogging:0.16,0,175.00,0,45.18,0,44.53,0.22
Debug - Datalogging:1.02,1,195.00,0,45.18,1,45.00,0.22
Debug - Datalogging:3.18,0,195.00,1,46.09,0,45.00,0.22
Debug - Datalogging:4.66,0,195.00,1,46.62,1,45.95,0.22
Debug - Datalogging:7.13,0,195.00,0,46.62,1,46.37,0.22
Debug - Datalogging:7.53,0,195.00,1,47.42,0,46.37,0.22
Debug - Datalogging:6.39,0,195.00,1,47.80,1,46.85,0.23
Debug - Datalogging:5.13,0,195.00,0,47.80,1,47.56,0.23
Debug - Datalogging:4.58,0,195.00,1,48.59,0,47.56,0.24
Debug - Datalogging:2.58,0,195.00,1,49.45,1,48.32,0.24
Debug - Datalogging:2.26,0,195.00,0,49.45,0,48.32,0.24
Debug - Datalogging:0.78,0,195.00,1,49.92,1,49.22,0.25
Debug - Datalogging:-0.15,0,195.00,1,50.67,0,49.22,0.25
Debug - Datalogging:-0.16,0,195.00,0,50.67,0,49.22,0.25
Debug - Datalogging:-0.14,0,195.00,0,50.67,0,49.22,0.25
Debug - Datalogging:0.32,1,215.00,1,51.20,1,49.62,0.25
Debug - Datalogging:3.23,0,215.00,0,51.20,0,49.62,0.26
Debug - Datalogging:5.02,0,215.00,1,52.17,1,50.08,0.26
Debug - Datalogging:7.26,0,215.00,0,52.17,1,50.52,0.27
Debug - Datalogging:7.57,0,215.00,1,52.85,0,50.52,0.27
Debug - Datalogging:5.86,0,215.00,1,53.85,1,51.20,0.27
Debug - Datalogging:5.15,0,215.00,0,53.85,1,51.73,0.28
Debug - Datalogging:4.57,0,215.00,1,54.15,0,51.73,0.28
Debug - Datalogging:2.59,0,215.00,1,54.86,1,52.67,0.28
Debug - Datalogging:1.66,0,215.00,0,54.86,1,53.55,0.29
Debug - Datalogging:0.75,0,215.00,1,55.31,0,53.55,0.29

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51

Debug - Datalogging:-0.48,0,215.00,1,55.68,1,54.04,0.29
Debug - Datalogging:-0.49,0,215.00,0,55.68,0,54.04,0.29
Debug - Datalogging:-0.48,1,235.00,0,55.68,0,54.04,0.29
Debug - Datalogging:0.98,0,235.00,1,56.20,0,54.04,0.30
Debug - Datalogging:3.92,0,235.00,0,56.20,1,54.90,0.30
Debug - Datalogging:5.34,0,235.00,1,57.02,1,55.65,0.30
Debug - Datalogging:7.36,0,235.00,1,57.53,0,55.65,0.31
Debug - Datalogging:6.14,0,235.00,1,58.24,1,56.25,0.30
Debug - Datalogging:5.60,0,235.00,0,58.24,1,56.56,0.30
Debug - Datalogging:4.27,0,235.00,1,58.58,1,57.22,0.30
Debug - Datalogging:3.34,0,235.00,1,59.18,0,57.22,0.30
Debug - Datalogging:1.16,0,235.00,1,60.02,1,58.20,0.30
Debug - Datalogging:1.13,0,235.00,0,60.02,0,58.20,0.31
Debug - Datalogging:-0.66,0,235.00,1,60.73,1,58.86,0.31
Debug - Datalogging:-0.65,0,235.00,0,60.73,0,58.86,0.31

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 7763533 Código de verificación: r8bJ2+NN

Firmado por: RAÚL LORENZO PARRADO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha 10/07/2025 16:00:35
DIMAS DÍAZ PERDOMO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 16:02:05
Pedro Antonio Toledo Delgado UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	10/07/2025 17:11:51