



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Automatización del llenado de un  
depósito de agua

Automation of the filling a water tank

Autora

Blanca González Clemente

Directores

Jesús Lázaro Plaza

Raúl Igual Catalán

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel

2022



## RESUMEN

Este trabajo consiste en realizar la automatización de un depósito de agua. Se ha realizado una simulación del sistema de automatización completo en un depósito real. Además, se ha implementado un prototipo físico compuesto por un sensor ultrasónico, un Arduino, pantalla LCD, indicador LED, etc. para realizar una demo con fines educativos. Este prototipo incorpora una placa electrónica que ha sido diseñada para lograr un resultado más compacto. También se ha diseñado un encapsulado que contiene todos los componentes. El encapsulado se ha impreso en 3D, obteniendo un prototipo final inalámbrico que mide el nivel de llenado de un recipiente.

## ABSTRACT

This study consists of automating a water tank. A simulation of the complete automation system has been carried out in a real water tank. In addition, a physical prototype composed of an ultrasonic sensor, an Arduino, LCD screen, LED indicator, etc. has been implemented to make a demo for educational purposes. This prototype incorporates an electronic board that has been designed to achieve a more compact result. A package containing all the components has also been designed. The package has been printed in 3D, obtaining a final wireless prototype that measures the fill level of a container.



## Índice de contenido

1	MOTIVACIÓN .....	1
2	OBJETIVOS .....	1
2.1	Objetivos iniciales del trabajo .....	1
2.2	Objetivos finales del trabajo .....	1
3	INTRODUCCIÓN .....	2
3.1	Explicación de la estructura de captación de agua de Corbalán.....	2
3.2	Consumo de agua en Corbalán. ....	6
4	ESTADO DE LA TÉCNICA.....	8
4.1	Conclusiones del estado de la técnica.....	13
5	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DEL DEPÓSITO .....	14
5.1	Programas utilizados. ....	14
5.2	Red de Petri.....	16
5.3	Diagrama de flujo.....	17
5.4	Guía GEMMA.....	18
5.5	Salidas del autómata. ....	19
5.6	Conexiones autómata-programa .....	20
6	MAQUETA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA DEL NIVEL DE UN DEPÓSITO .....	20
6.1	Elementos utilizados .....	20
6.2	Desarrollo del trabajo con sensor ultrasónico. ....	21
6.3	Montaje del circuito eléctrico. ....	23
6.4	Montaje del sensor en el depósito simulado. ....	24
6.5	Cálculos realizados para las mediciones. ....	25
6.6	Programación en Arduino. ....	26
6.7	Filtro paso bajo.....	29
6.8	Control PID .....	29
6.9	Diseño de la placa.....	30
6.10	Diseño del encapsulado. ....	34
6.11	Montaje del encapsulado.....	40
6.12	Puesta en funcionamiento de la maqueta. ....	41

7	CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.....	42
7.1	Principales conclusiones del trabajo realizado .....	42
7.2	Limitaciones que ha tenido el TFG .....	43
7.3	Líneas de trabajo futuro.....	43
8	REFERENCIAS.....	43

## **ANEXOS**

Anexo I: Programación de entradas y salidas del autómata para el depósito (anexo digital)

Anexo II: Simulación del depósito de agua en Factory IO (anexo digital)

Anexo III: Código Arduino (anexo digital)

Anexo IV: Diseño de la placa electrónica (anexo digital)

Anexo V: Diseño del encapsulado (anexo digital)

Anexo VI: Manuales consultados (anexo digital)

Anexo VII: Consumos de agua Corbalán (anexo digital)

Anexo VIII: Conexión PLC-SFW (anexo digital)

Anexo IX: Esquema del circuito electrónico (anexo digital)

## Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa entre los diferentes sensores.....	12
Tabla 2. Conexiones del circuito eléctrico.....	23
Tabla 3. Coste del prototipo.....	41

## Índice de figuras

Figura 1. Foto del depósito visto desde el exterior.....	2
Figura 2. Foto del depósito visto desde el interior, lado de la izquierda.....	3
Figura 3. Sonda de presión en el depósito.....	3
Figura 4. Autómata que indica la señal del depósito en el pozo. ....	3
Figura 5. Llave del autómata real en el depósito de Corbalán.....	4
Figura 6. Ampliación donde está el programador de tiempos.....	5
Figura 7. Cuadro antiguo de la zona eléctrica en el pozo. ....	5
Figura 8. Control Automático / Reposo / Manual en el pozo. ....	5
Figura 9. Gráfica del consumo medio de agua en Corbalán 2020 .....	6
Figura 10. Gráfica del consumo medio de agua en Corbalán 2021 .....	6
Figura 11. Consumo de agua Corbalán febrero 2021 .....	7
Figura 12. Consumo de agua Corbalán agosto 2021.....	8
Figura 13. Ejemplo de sensor de nivel de agua flotador [2]. .....	9
Figura 14. Ejemplo de sensor hidrostático [3]. .....	9
Figura 15. Ejemplo de sensor radar [4]. .....	10
Figura 16. Ejemplo de sensor radar guiado [5]. .....	10
Figura 17. Ejemplo de sensor por ultrasonidos[6]. .....	11
Figura 18. Ejemplo de sensor capacitivo[8]. .....	11
Figura 19. Ejemplo de sensor de agua por presión [10]. .....	11
Figura 20. Ejemplo del funcionamiento de un sensor de agua por burbujeo [11]. .....	12
Figura 21. Ejemplo de sensor de agua conductivo [12]. .....	12
Figura 22. Selección del autómata con el que se trabaja.....	14
Figura 23. Implementación de la guía GEMMA en el software. ....	15
Figura 24. Salidas del programa en el software. ....	15
Figura 25. Depósito de agua en Factory I/O.....	16
Figura 26. Cuadro de mandos del depósito en Factory I/O. ....	16
Figura 27. Conexiones PLC con software. ....	20
Figura 28. Funcionamiento del sensor ultrasónico [19].....	21
Figura 29. Distribución de los pines del HC-SR04 [19]. .....	22
Figura 30. Pulso recibidos y enviados por el sensor [Datasheet(Anexo VI)]. .....	22
Figura 31. Sensor ultrasónico con soporte casero. ....	24
Figura 32. Sensor apoyado en el recipiente.....	25
Figura 33. Montaje del circuito en protoboard.....	25
Figura 34. Esquemático del circuito electrónico.....	30
Figura 35. Diseño de la placa board. ....	31
Figura 36. Placa impresa por la cara de arriba (top). ....	32
Figura 37. Comprobación de pines de la placa en el Arduino.....	32
Figura 38. Pines soldados para conectar al Arduino. ....	33

Figura 39. Placa vista desde arriba con los componentes y cables para batería y sensor.....	33
Figura 40. Placa vista desde el lado con los componentes soldados.....	33
Figura 41. Macarrón termorretractil.....	34
Figura 42. Croquis del encapsulado.....	35
Figura 43. Diseño 3D caja encapsulado.....	35
Figura 44. Diseño 3D de la tapa del encapsulado.....	36
Figura 45. Encapsulado de cartón, vista 3D.....	36
Figura 46. Encapsulado en cartón, visto desde arriba.....	37
Figura 47. Generación de ficheros gcode en Ultimaker Cura.....	37
Figura 48. Simulación en Cura de la impresión de la pieza.....	38
Figura 49. Inicio del primer intento impresión 3D del encapsulado.....	38
Figura 50. Progreso de la impresión 3D de la caja del encapsulado.....	38
Figura 51. Caja del encapsulado impresa al 70%.....	39
Figura 52. Caja del encapsulado terminada.....	39
Figura 53. Lado del encapsulado donde se ve la forma de árbol al imprimir.....	39
Figura 54.Tapa del encapsulado al 50 % de su impresión.....	40
Figura 55. Tapa del encapsulado impresa en 3D.....	40
Figura 56. Encapsulado.....	40
Figura 57. Puesta en funcionamiento del modelo.....	41

## 1 MOTIVACIÓN

La motivación para realizar este proyecto es facilitar la vida y optimizar el tiempo de los trabajadores que se encargan de mantener el suministro de agua en Corbalán, un pueblo de 60 habitantes.

El pueblo dispone de un depósito de agua para suministrarla a las casas. A él, el agua llega a través de una bomba desde un pozo, y hay que programar un autómata con el tiempo que queremos que suba agua al depósito. Sin embargo, tal y como inicialmente estaba montado el sistema, podía haber desbordamientos, o dejar corto el suministro de agua, ya que no siempre se gasta la misma cantidad de agua y el depósito carecía de un sistema de regulación. El autómata del pozo estaba programado para activar una bomba siempre el mismo tiempo; lo que era un foco de problemas, y requería la intervención diaria de los operarios. También hay que tener en cuenta que no hay los mismos habitantes en invierno que en verano, ya que en verano la población se multiplica por 5, fácilmente.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos iniciales del trabajo

El objetivo principal es poner unos sensores encargados de medir la cantidad de agua que hay en el depósito, para que, a la hora de llenarlo, implementar un control en lazo cerrado que sustituya al actual control en lazo abierto basado en cálculos aproximados de lo que se ha gastado y lo que se va a gastar de agua. Un enfoque de control en lazo cerrado evitaría los desbordamientos y situaciones de desabastecimiento de agua que se producen eventualmente con el actual control en lazo abierto.

El objetivo secundario, es facilitar el trabajo a los encargados del depósito, ya que tienen que ir todas las mañanas a ver si ha subido el agua por la noche y se ha llenado correctamente, o si hay probabilidades de que se quede corto el suministro dependiendo de la población del pueblo.

Y, por último, se pretende realizar la mejora en el depósito del agua, ya que no es conveniente tener una persona todos los días haciendo eso. Poniendo sensores se facilitará mucho el trabajo y solo hará falta ir a supervisar si está todo en orden los primeros días. Despues, con ir una vez a la semana o cada quince días para comprobar que todo funciona correctamente, será suficiente. También existe la posibilidad de que haya caídas de tensión en la red y el autómata se quede sin corriente eléctrica. Por lo tanto, no funcionaría, ni la bomba del pozo ni el sensor.

### 2.2 Objetivos finales del trabajo

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) se empezó a realizar en otoño de 2021. Desde esa fecha hasta la actualidad el Ayuntamiento de Corbalán contactó con una empresa externa para llevar a cabo

los objetivos iniciales planteados en este proyecto, ya que el estado del depósito acarreaba grandes molestias a los vecinos. Por tanto, se tuvo que realizar un cambio en el propósito del TFG ya que la idea inicial carecía de sentido práctico al haber sido ya implementada.

Por ello, se optó por realizar el sistema de control automático del nivel de agua de un depósito en una maqueta de prueba. Se utilizará un sensor de nivel y un microcontrolador encargado de leer sus datos y realizar el control automático. El sistema total se encapsulará para lograr un prototipo portátil plenamente funcional. El propósito de este prototipo será utilizarlo como práctica en las asignaturas de control y automatización del Grado. Por tanto, el TFG tiene ahora una finalidad educativa.

Previamente se realizará también una simulación de la idea inicial (objetivos iniciales) en un software de automatización industrial.

### 3 INTRODUCCIÓN

#### 3.1 Explicación de la estructura de captación de agua de Corbalán.

Como se ha descrito anteriormente, Corbalán es un pueblo de un número reducido de habitantes, y el agua que se distribuye al pueblo es suministrada desde un depósito (Figura 1) que está situado en una zona alta para aprovechar el efecto de la gravedad en el transporte del agua, ya que no hace falta ninguna bomba externa. Este esquema a veces tiene sus inconvenientes, porque las casas que están con poco desnivel respecto al depósito, conforme este se va vaciando, va perdiendo presión el agua que sale por los grifos. Por eso es importante que, durante el día, no caiga el agua por debajo de un determinado nivel.



Figura 1. Foto del depósito visto desde el exterior.



Figura 2. Foto del depósito visto desde el interior, lado de la izquierda.

Actualmente, la captación de agua del pozo al depósito (Figura 2), consiste en llevar agua de dos pozos distintos: un manancial de agua natural y un pozo que extraen el agua con una bomba. Para ello, durante la realización de este TFG, se ha automatizado la captación de agua del depósito. Desde enero de 2022 hay una sonda de presión (Figura 3), encargada de medir porcentualmente el agua que hay. Y un autómata en el que dependiendo del agua que hay en el depósito, lo llena con una cantidad u otra de cada pozo. Debido a los minerales que lleva el agua del manancial, de ahí solo puede haber un 15% máximo del total de agua del depósito, y el 85% restante deberá provenir del pozo.



Figura 3. Sonda de presión en el depósito.



Figura 4. Autómata que indica la señal del depósito en el pozo.

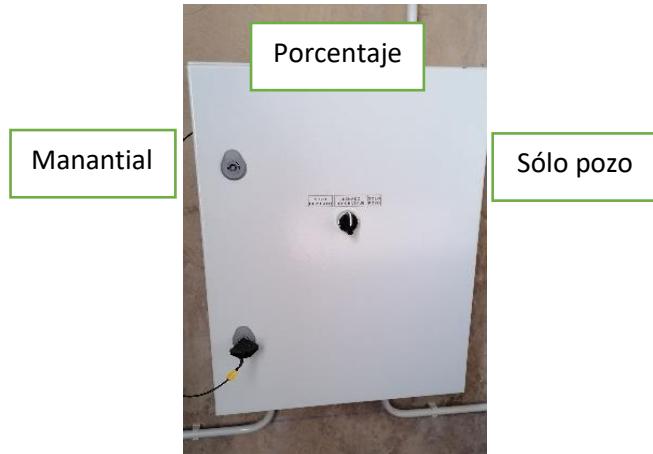


Figura 5. Llave del autómata real en el depósito de Corbalán.

Anteriormente, el depósito únicamente estaba conectado al pozo, de donde subía el agua todos los días durante el tiempo que se programaba. El mecanismo era diferente, ya que, en el espacio habilitado para la parte eléctrica del pozo, había un autómata junto con un programador horario. El programador marcaba las horas de funcionamiento de la bomba, y según en qué rango de horas del día se hubiera programado, subía el agua al depósito. En los meses de julio a septiembre, había que programarlo de 5 a 7 de la mañana para que subiera el agua, pero sin embargo de septiembre a diciembre, con 30 o 45 minutos era suficiente, llegando a desbordar algunos días, a la vez que, en días puntuales como las vacaciones de Navidad, llegó a faltar agua y, por lo tanto, hubo que programarlo más tiempo para esos días. Lo de programar el autómata para que active la motobomba por la noche, principalmente era por ahorro energético.



*Figura 7. Cuadro antiguo de la zona eléctrica en el pozo.*



*Figura 6. Ampliación donde está el programador de tiempos.*

Debido al trabajo costoso que llevaba ir todos los días a comprobar si había suficiente agua, y si fuera necesario a activar manualmente la bomba en el pozo, se pensó en añadir realimentación para cerrar el lazo de control, poniendo un sensor que detectase cuando el depósito estaba lleno, para evitar que el agua desbordase y perdiéramos agua, y un sensor que detectase cuando el depósito estaba por menos de la mitad, para que así se activase la bomba automáticamente sin necesidad de ir a activarla manualmente durante el día. Esto podría haberse hecho, aún y cuando por la noche se llenase el tiempo que estuviera programado. Pero así se evitaría que una persona estuviera pendiente del depósito todos los días del año.



*Figura 8. Control Automático / Reposo / Manual en el pozo.*

Como el sistema ha sido automatizado en paralelo durante la realización de este proyecto, la implementación no ha sido posible. En su lugar, se ha realizado una simulación en el laboratorio, teniendo en cuenta la idea inicial, pero con un depósito simulado en formato maqueta.

### 3.2 Consumo de agua en Corbalán.

Ya se ha comentado que la variación de consumo de agua en Corbalán es muy cambiante a lo largo del año, por ello no se puede tener siempre un mismo tiempo de llenado del depósito. En las siguientes gráficas (Figura 9) y (Figura 10), podemos ver los datos del consumo de agua del año 2020 y 2021.

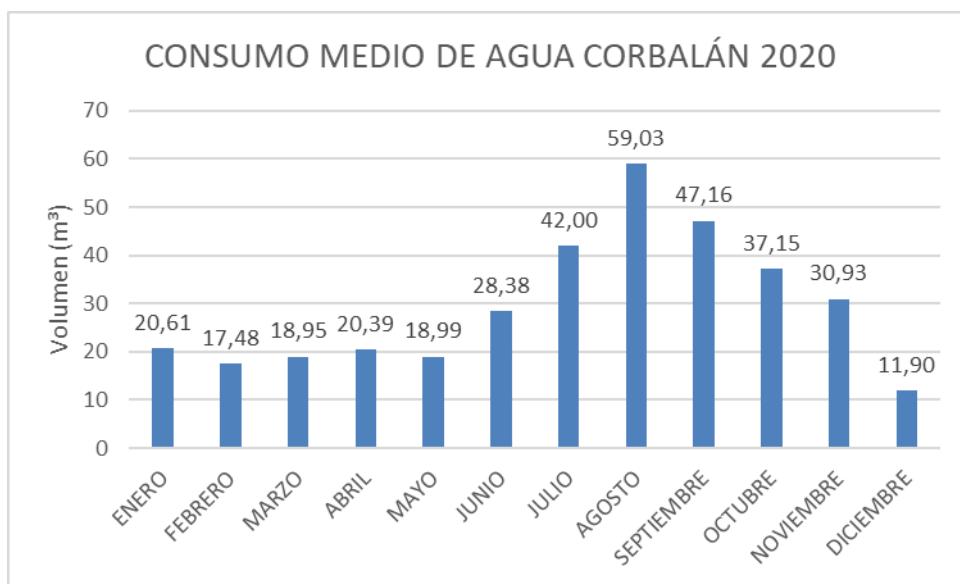


Figura 9. Gráfica del consumo medio de agua en Corbalán 2020

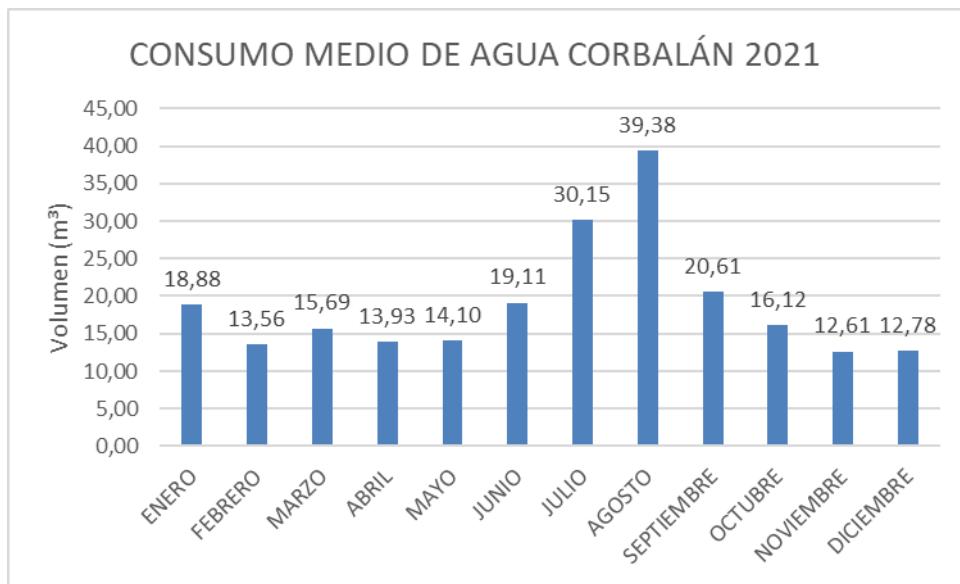


Figura 10. Gráfica del consumo medio de agua en Corbalán 2021

Viendo las gráficas confirmamos lo que se comentaba anteriormente, que es en los meses de verano cuando más gente hay en el pueblo, por lo tanto, más consumo de agua hay. En los meses de invierno, hay días que el gasto está alrededor de 10 m<sup>3</sup>.

Como dato curioso, al ver las dos gráficas de los dos últimos años seguidas, podemos observar que, en el año 2020, después del confinamiento del COVID19, hubo mucho más gasto de agua que los meses anteriores. Eso es debido a que no el pueblo se encontraba lleno durante el verano. En el año 2021, se puede ver que no es tan grande el consumo como en el año anterior. En relación a la desescalada hasta los meses de invierno, se puede ver que en 2020 fue más progresiva que en 2021.

También hay que tener en cuenta que en Corbalán no hay río ni acequias donde se pueda coger el agua para regar los huertos, por lo que en los meses de verano es necesario utilizar agua corriente para llenar las respectivas cubas para regar en los huertos. Y eso también hace que sea muy variable el consumo de agua, ya que si hace mucho calor será necesaria más agua, pero si es un año de lluvias, no se gastará tanta.

A continuación (Figura 11) y (Figura 12), vamos a ver una comparativa del consumo por días del mes de febrero y del mes de agosto del último año, para ver las grandes diferencias que hay entre unos meses y otros.

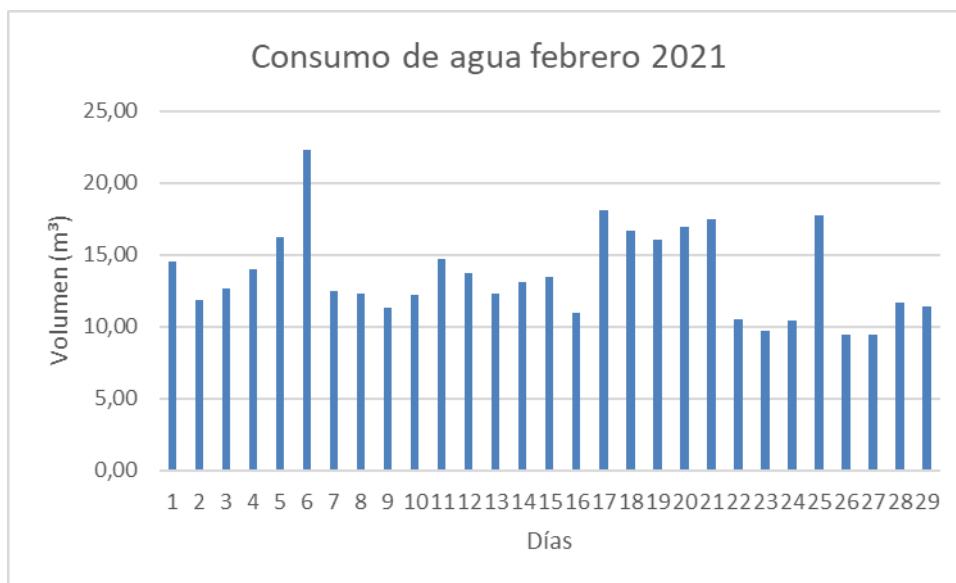


Figura 11. Consumo de agua Corbalán febrero 2021



Figura 12. Consumo de agua Corbalán agosto 2021

En el mes de febrero podemos ver que el día que más agua llega a gastarse son 22 m<sup>3</sup>, sin embargo, esa cantidad no es ni el mínimo de lo que se consume en el mes de agosto. Igual que vemos que en invierno hay días que no se llega ni a los 10 m<sup>3</sup>, en agosto se puede llegar a multiplicar por 6 el consumo de un día mínimo de febrero.

La conclusión de todo esto es que es necesario un control automático del llenado del depósito, porque debido a las grandes variaciones de consumo de agua, es muy difícil evitar desabastecimiento o desbordamientos, ya que hay que tener a una persona controlando siempre el depósito.

Los datos obtenidos de los consumos de agua, han sido cedidos por Aguas de Teruel [1] y se encuentran en el Anexo VII.

## 4 ESTADO DE LA TÉCNICA

Para dar respuesta a los objetivos iniciales del TFG se realizó un estado de la técnica sobre sensores que podrían instalarse en el depósito para lograr el control automático del suministro.

Existen varios tipos de sensores de nivel:

-**Sensores de flotador:** sirven para líquidos, las principales ventajas son que tienen una medición precisa, son insensibles a la espuma y la viscosidad y tienen un precio asequible. Pero tienen desventajas como que son sensibles a las ondulaciones, tienen un rango pequeño de medición y no son aptos para productos corrosivos. Son los más empleados en la actualidad. Además, su funcionamiento es muy sencillo ya que constan de una boya que se mantiene flotando en el agua, marcando el nivel deseado. Cuando se sobrepasa ese nivel, la boya acciona el interruptor de nivel e informa mediante una señal.

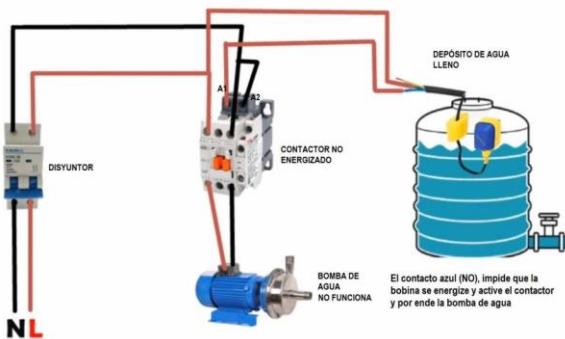


Figura 13. Ejemplo de sensor de nivel de agua flotador [2].

**-Sensores hidrostáticos:** sirven para líquidos. Sus principales ventajas son que tienen una medición precisa, son insensibles a la espuma y la viscosidad, son fáciles de instalar y tienen un amplio rango de medición. Las desventajas son el mantenimiento, ya que hay que vaciar el tanque para montar y desmontar.



Figura 14. Ejemplo de sensor hidrostático [3].

**-Sensor radar:** sirve para líquidos, sólidos y pastas. Sus ventajas son que se puede medir sin contacto, está exento de mantenimiento, es fácil de instalar, tiene una medición muy precisa y su rango es regulable y además es resistente a altas temperaturas (hasta 450°C). La desventaja que tiene es que es sensible a los productos conductores de la electricidad.



Figura 15. Ejemplo de sensor radar [4].

-**Sensor radar guiado:** sirve para líquidos, sólidos y pastas. Las principales ventajas son la medición sin contacto, muy precisa y de amplio rango, son insensibles a las turbulencias en la superficie y es insensible a las condiciones ambientales. Su desventaja es la misma que los anteriores, que es sensible a los productos conductores de electricidad.



Figura 16. Ejemplo de sensor radar guiado [5].

-**Sensor por ultrasonidos:** sirve para líquidos y sólidos. Funcionan emitiendo una onda hasta llegar al líquido y rebota hasta ser captada por el sensor y, con las variaciones de tiempo en la recepción de la onda, se conoce el cambio del nivel del agua en el recipiente. Sus ventajas son la medición sin contacto, precisa y de amplio rango (hasta 5 m), autolimpieza y fácil instalación. Las desventajas son mayores que en los anteriores, ya que es sensible a las variaciones de temperatura, a las presiones y temperaturas extremas y a los productos conductores de la electricidad, y además es inadecuado para productos espumosos o que liberan polvo.

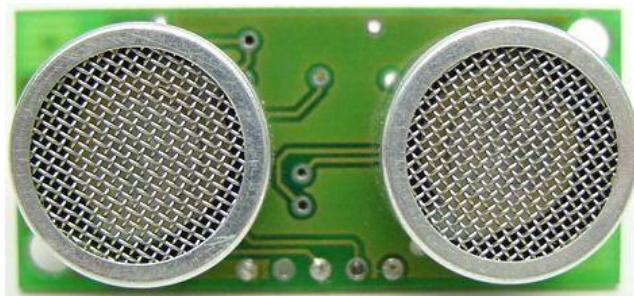


Figura 17. Ejemplo de sensor por ultrasonidos[6].

-**Sensor capacitivo:** sirve para todos los tipos de fluidos. Las ventajas que tiene es que es insensible a las características del producto, resistente a los productos agresivos, temperaturas y presiones extremas. Y puede medir sin contacto. Las desventajas son que tiene un mantenimiento costoso[7].



Figura 18. Ejemplo de sensor capacitivo[8].

-**Sensor de agua por presión:** son los más adecuados para las aplicaciones de medida en profundidad. Diseñados para trabajar con líquidos como agua, aceite, cloro, etc. Entre las ventajas que tienen es que presentan una gran robustez para trabajar en materiales corrosivos. Su funcionamiento consiste en medir el nivel de presión que ejerce el líquido que hay sobre ellos, su unidad de medida es mca (metros de columna de agua). Pueden proporcionar señales de salida amplificadas [9].



Figura 19. Ejemplo de sensor de agua por presión [10].

-**Sensor de agua por burbujeo:** es una varilla que llega hasta el fondo del recipiente, en el que el líquido se mueve por el aire a través de ella. Y en el punto más bajo habrá una presión que

equivaldrá al nivel del agua y se retransmite al punto más alejado del recipiente, en el que habrá un sensor de presión.

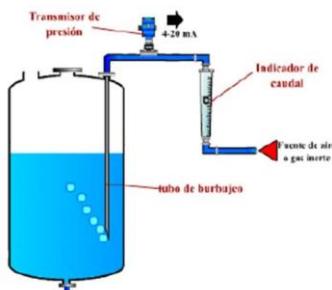


Figura 20. Ejemplo del funcionamiento de un sensor de agua por burbujeo [11].

-**Sensor de agua conductivo:** se utiliza para medir el nivel en líquidos que son conductores de la electricidad. Tiene un funcionamiento sencillo, ya que se basa en un circuito eléctrico pequeño con una pila y se cierra en el momento que el agua cubra los polos de la pila.



Figura 21. Ejemplo de sensor de agua conductivo [12].

Los tipos de sensores y sus definiciones se han obtenido de las siguientes referencias: [7], [9], [13]–[17].

A continuación, se muestra en la siguiente tabla una comparativa con los precios, ventajas y desventajas de cada sensor. En caso de haya que definir una longitud del cable, lo haremos para 5 m.

Tabla 1. Comparativa entre los diferentes sensores.

Tipo de sensor	Precio	Ventajas	Desventajas
<b>Sensor flotador</b>	23,99€	Barato y preciso	Sensible a las ondulaciones
<b>Sensor hidrostático</b>	46,99€	Preciso y fácil de instalar	Mantenimiento

<b>Sensor radar</b>	660,00€	Preciso y fácil de instalar	Sensible a productos conductores de electricidad
<b>Sensor radar guiado</b>	1343,52€	Medición sin contacto y muy precisa	Sensible a productos conductores de electricidad.
<b>Sensor por ultrasonidos</b>	2,39€	Barato, medición sin contacto y precisa	Sensible a variación de temperatura y de presión
<b>Sensor capacitivo</b>	8,89€	Es barato y sirve para infinitas aplicaciones	Mantenimiento costoso
<b>Sensor por presión</b>	204,47€	Apto para materiales corrosivos	Gran coste
<b>Sensor conductivo</b>	148,50€	Para líquidos que conducen la electricidad	Algo caro

En todos los precios se ha incluido el IVA.

#### 4.1 Conclusiones del estado de la técnica

Dependiendo de las características del líquido que fuéramos a utilizar, habría que elegir un sensor u otro. Y también habría que tener en cuenta el presupuesto y las condiciones ambientales.

En este caso, para nuestro proyecto, vamos a utilizar un sensor por ultrasonidos, ya que, debido a los cambios de la idea inicial, vamos a tener que realizarlo en el laboratorio a pequeña escala.

La idea principal era montar el sensor en el depósito de Corbalán, pero en el tiempo que hemos estado buscando y preparando las cosas para realizarlo, ha habido cambios en el depósito, en los cuales se ha implementado un selector para subir agua de 2 pozos distintos, de los cuales se sube una cantidad específica de agua de cada uno, para que la mezcla de minerales y otras sustancias este compensada. Para ello ha sido necesario poner un sensor que mida cuánta agua hay en el pozo con exactitud y, además, que mande una señal a cada pozo para que suba la correspondiente agua. El control del depósito incorpora ya la funcionalidad que se estaba desarrollando en este TFG.

## 5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DEL DEPÓSITO

Comenzamos presentando la simulación del sistema de automatización del depósito de Corbalán.

### 5.1 Programas utilizados.

Para la simulación, los programas, software y autómata que se han utilizado son los siguientes:

1. Para la simulación del autómata, se ha utilizado el Machine Expert Basic. Este programa es un entorno de programación real de autómatas Schneider que además permite simular autómatas para testear programas. En este caso, el autómata que utilizado es el TM221CE24R, el cual tiene 14 entradas digitales, 10 salidas de relé (2A), 2 entradas analógicas, 1 puerto de línea serie, 1 puerto Ethernet, controlador compacto de 100 a 240V CA con bloques de terminales extraíbles. El motivo de esta elección es que este autómata está físicamente disponible en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel (EUPT).

En las siguientes figuras se puede ver el entorno de programación del software Machine Expert Basic. En la Figura 22 se puede ver el apartado de ‘Configuración’, donde se elige el autómata con el que se va a trabajar y las características que tiene.

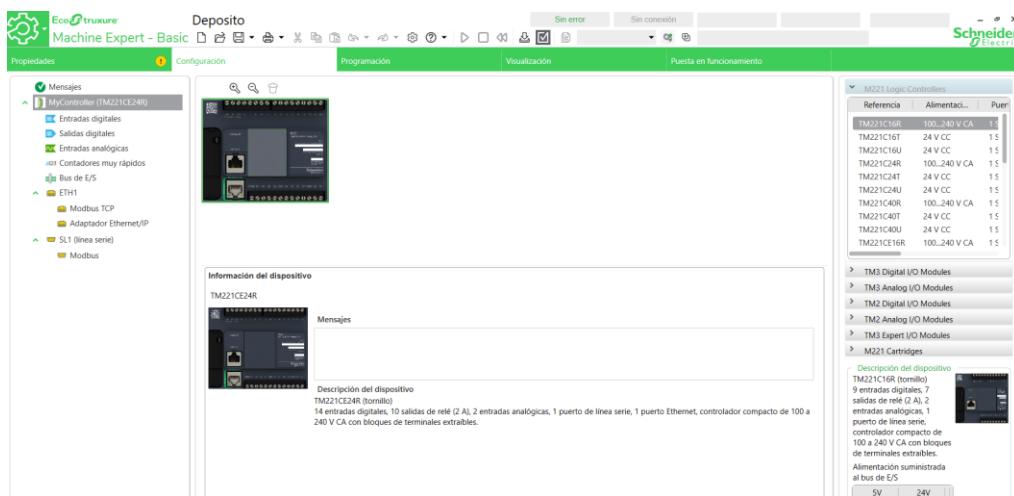


Figura 22. Selección del autómata con el que se trabaja.

En la sección de ‘Programación’ se configuran las salidas del sistema. En la Figura 23 se puede ver la implementación de la guía GEMMA en el software. Donde las transiciones son las barras rectangulares horizontales negras y los estados son los cubos. En cada transición se programa la condición. En este caso la del funcionamiento automático o manual.

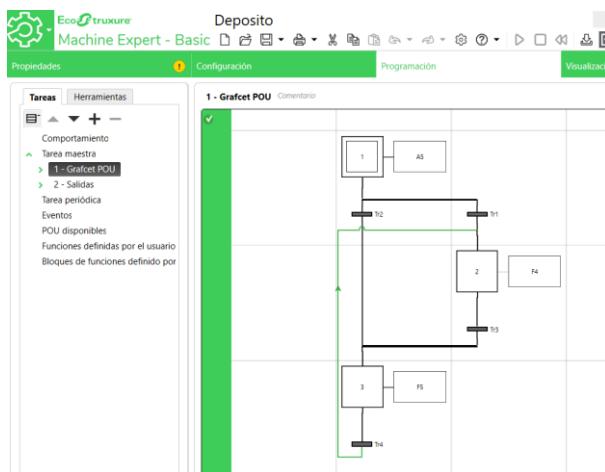


Figura 23. Implementación de la guía GEMMA en el software.

Y a continuación, en la Figura 24, se pueden ver las salidas del autómata. En este caso sería para abrir o cerrar la válvula que echa agua al depósito.

Toda la programación con los programas completos se encuentra en el Anexo I.

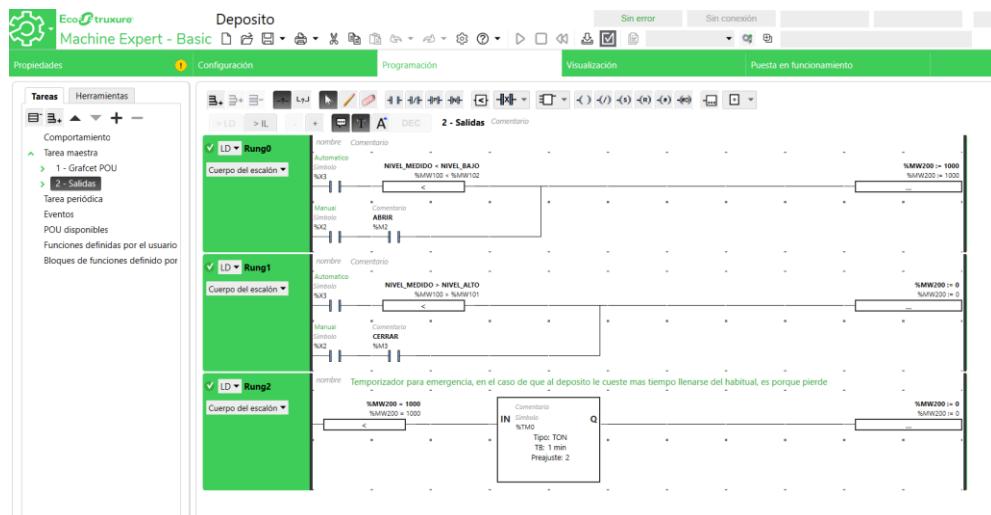


Figura 24. Salidas del programa en el software.

2. Para simular el depósito, se ha utilizado el software Factory I/O, que incluye un tanque virtual que simula el depósito de agua. Tiene una entrada por arriba por donde entra el agua, según lo programado. Y abajo del tanque hay una salida de agua, que simularía el agua que consumen los vecinos del pueblo. Además, tiene un medidor de nivel de agua, en el que definimos unos valores, para determinar cuál sería el nivel alto, nivel medio y nivel bajo. También colocamos un cuadro de mando, en el que hay dos indicadores de ‘nivel bajo’ y ‘nivel alto’, una seta de emergencia, y dos llaves: una llave para ponerlo en ‘manual’ o ‘automático’ y la otra llave para ‘abrir’ o ‘cerrar’ la entrada de agua.

En la Figura 25 se puede observar la vista del depósito simulado en el software junto con su cuadro de mandos (Figura 26).

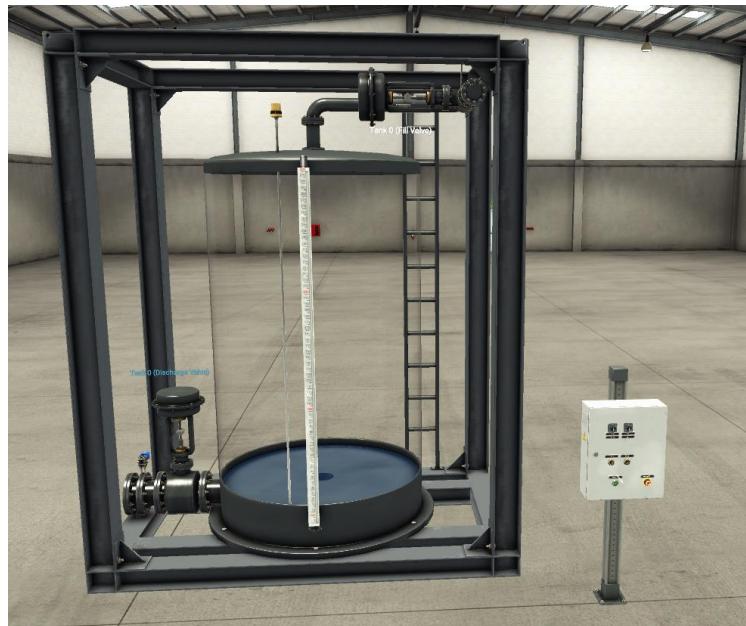


Figura 25. Depósito de agua en Factory I/O.



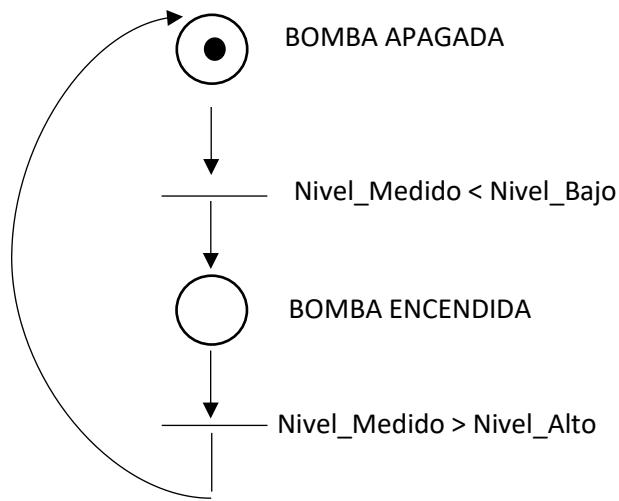
Figura 26. Cuadro de mandos del depósito en Factory I/O.

El programa completo se encuentra en el Anexo II.

## 5.2 Red de Petri.

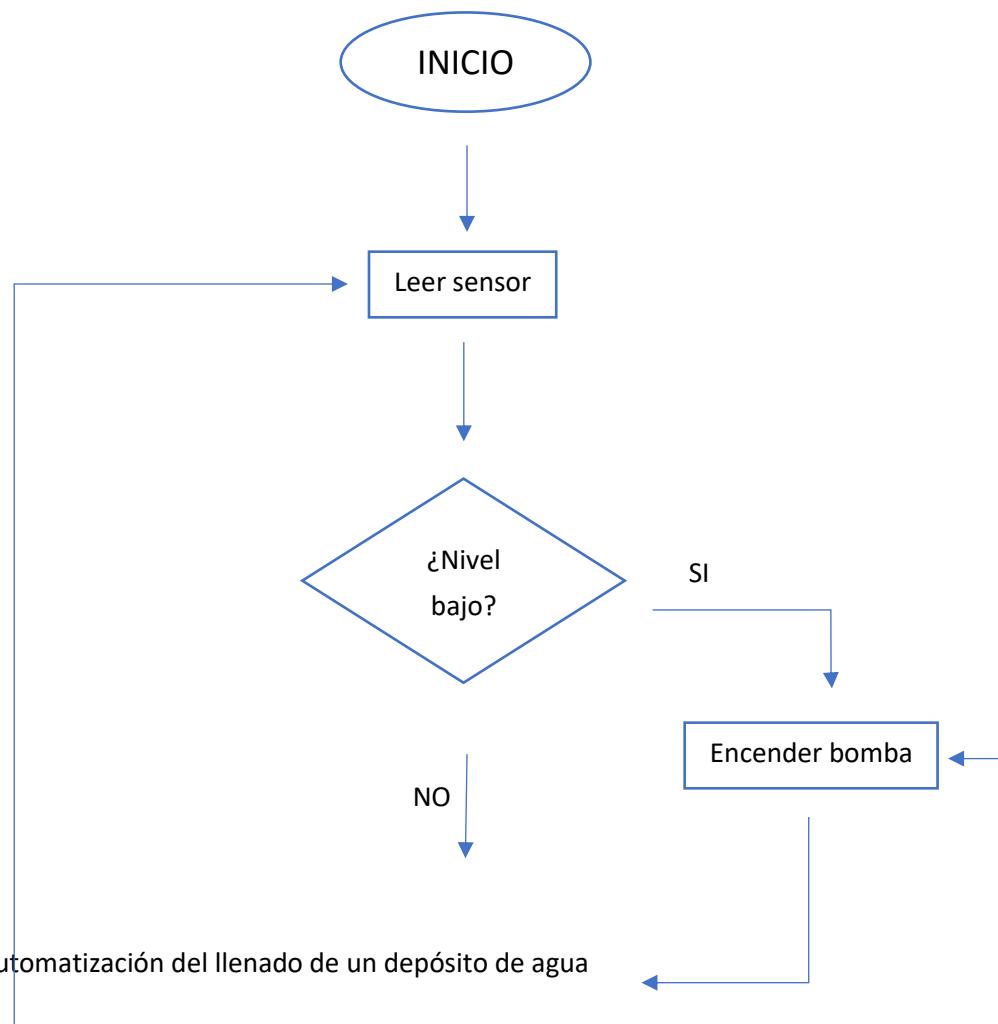
En este apartado se presenta la red de Petri asociada al sistema de automatización: partiendo del reposo, se lee el sensor e indica si está lleno o vacío. Si está vacío, activa la bomba de llenado

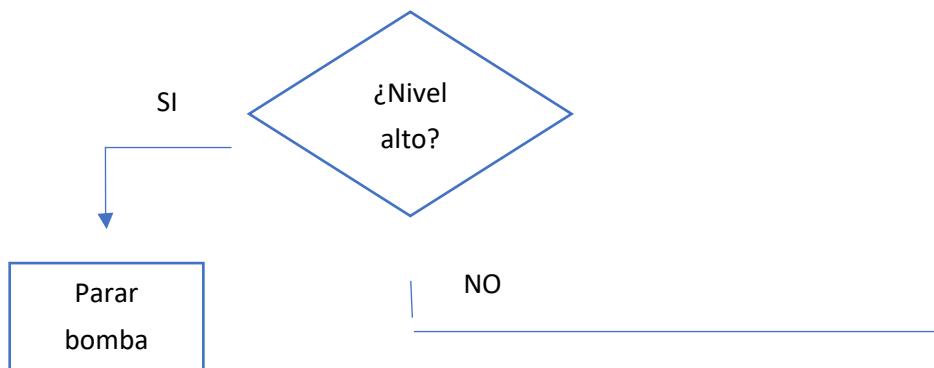
del agua. El sensor lee, y si está ya lleno el depósito, se para la bomba de agua y vuelve otra vez al estado reposo. Este flujo se repite indefinidamente.



### 5.3 Diagrama de flujo.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del código de la simulación del depósito.





Partiendo del sistema en reposo, comprobamos si el sensor indica que está en nivel bajo o en nivel alto. Si el nivel medido es bajo, significa que el depósito se está quedando sin agua, por lo tanto, hay que activar la válvula de llenado para que llegue al nivel alto. Esto puede hacerse manualmente o de forma automática, según esté programado.

Cuando el nivel medido llega al nivel alto, la válvula se cierra automáticamente o, por el contrario, podemos cerrarla manualmente si esta activado el modo manual.

Además, hay un temporizador conectado, para que, en caso de que tarde más tiempo del habitual en llenarse el depósito, se detecte que hay una avería (o al menos, que pierde más agua de la que entra).

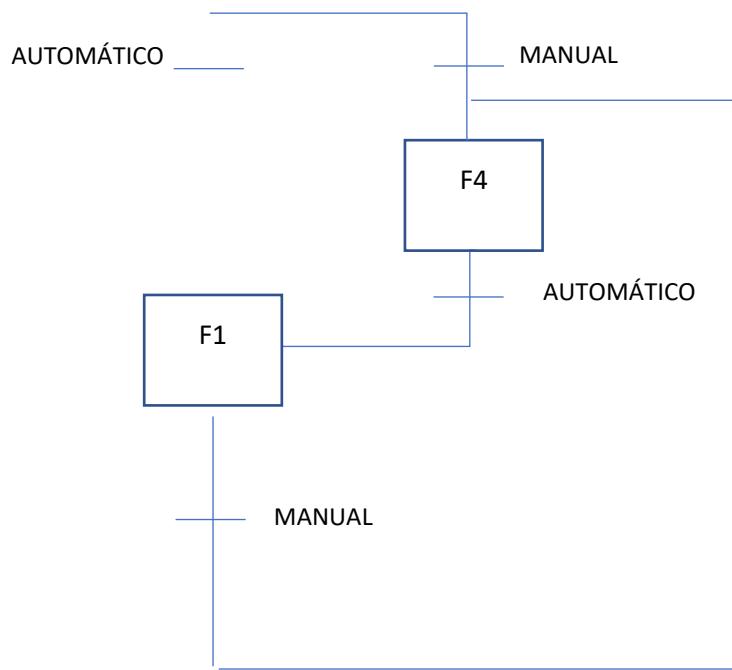
Desde el programa de Machine Expert se hace toda la simulación del autómata. En él se programa la Guía Gemma (5.4), con la que simulamos el modo manual o automático, en función de las salidas que tenemos.

Esta simulación del autómata, se conecta al depósito del Factory I/O, y desde ahí podemos ver el cuadro de mandos, con los botones de manual y automático y de cerrar y abrir la válvula de llenado.

Existe la seta de emergencia, para parar manualmente en caso de avería o emergencia. También existe la detección de emergencia en las salidas del autómata, cuando vemos que tarda más tiempo del necesario en llenarse, también se para la bomba de llenado.

#### 5.4 Guía GEMMA.





En la implementación de la guía GEMMA se utiliza para automatizar el proceso, A5 significa que está en preparación para la puesta en marcha después de un defecto; F4 es la marcha de verificación sin orden; F1 significa producción normal, es decir, el estado en que está funcionando normalmente, si no se indica lo contrario. En este caso, el modo automático es el que va a ser por defecto, y el manual el que se fuerza.

También se implementa una emergencia para detectar fugas, que se explica en el siguiente apartado (5.5).

## 5.5 Salidas del autómata.

La salida que activa la bomba de llenado de agua se activa cuando está en el modo automático y además el nivel medido es menor que el nivel bajo; o cuando está en modo manual y se pulsa el interruptor de abrir la electroválvula.

La bomba de llenado se para cuando está en modo automático y el nivel medido es mayor que el nivel alto; o cuando está el modo manual activado y el selector de la electroválvula en Cerrar.

También se ha implementado un modo de emergencia, con el que, si la bomba de llenado está en funcionamiento más de 1 minuto, se detecta que hay una fuga y se para la bomba de llenado.

Todas estas salidas están relacionadas con la simulación en el programa Factory I/O, donde también está simulado un cuadro de mandos, con los selectores de manual y automático. Y los de cierre y apertura de las electroválvulas de la bomba de llenado.

En la Figura 24 y la Figura 26 podemos ver las salidas del autómata en el programa simulado y el cuadro de mandos que controla el depósito simulado.

## 5.6 Conexiones autómata-programa

En la Figura 27 se pueden ver las conexiones del autómata con el programa Factory IO. En el caso de que no se aprecien bien, se adjunta en el anexo VIII un documento en .jpg donde poder ampliar.

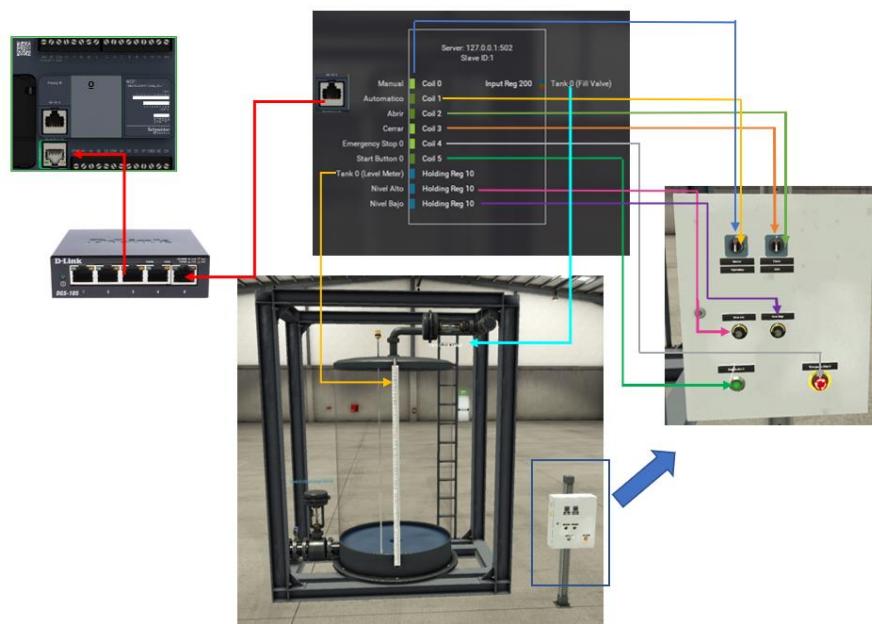


Figura 27. Conexiones PLC con software.

## 6 MAQUETA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA DEL NIVEL DE UN DEPÓSITO

En este apartado se describe el prototipo físico implementado que mide el nivel de agua de un depósito. Este prototipo tiene fines educativos y podrá utilizarse en asignaturas de automatización del grado.

### 6.1 Elementos utilizados

En esta sección se describen los diferentes elementos utilizados.

El elemento central es la placa Arduino que se programa en el entorno de programación de Arduino, con sus respectivas librerías. Los elementos secundarios son el sensor ultrasónico y la LCD para mostrar los valores medidos con el sensor y programados con Arduino. La LCD y el sensor también tienen su propia librería. Cuenta también con un LED para hacer la simulación

de un motor en marcha, un potenciómetro para regular el brillo de la LCD y un interruptor para encender o apagar la pila de 9 V que alimenta el circuito cuando no está conectado al ordenador.

También se ha utilizado el programa EAGLE, para diseñar una placa con todo el circuito electrónico. Esta placa se hizo en la última etapa del proyecto ya que primero el circuito se implementó en una protoboard.

Por último, se utiliza FreeCAD para el diseño del encapsulado y su posterior impresión en 3D, para la cual se utiliza el programa Cura. También se ha utilizado una impresora 3D para obtener el encapsulado físico.

## 6.2 Desarrollo del trabajo con sensor ultrasónico.

Para emular el depósito en el laboratorio, se ha utilizado un sensor ultrasónico y un pequeño recipiente con el que se representa lo que sería el depósito real. El sensor está conectado a un microcontrolador (Arduino), con el que podemos ver el porcentaje de agua que hay en el depósito.

Se ha elegido un sensor de ultrasonidos para la simulación ya que tiene un precio bajo y tiene una relación calidad/precio buena, para realizar esta demostración. El tipo de sensor es un HC-SR04 que funciona con un par de transductores de ultrasonido que se utilizan para determinar la distancia del sensor al objeto, en este caso sería el agua. Para que funcione con mayor precisión, es conveniente que esté situado enfrente de lo que se va a medir.

*“Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente de salida, de valores muy pequeños en términos relativos con respecto a un generador[18].”*

Uno de los transductores emite una ráfaga de ultrasonido y el otro capta el rebote de la onda. El tiempo que tarda la onda en ir y volver al objeto determina la distancia entre el sensor y el obstáculo.

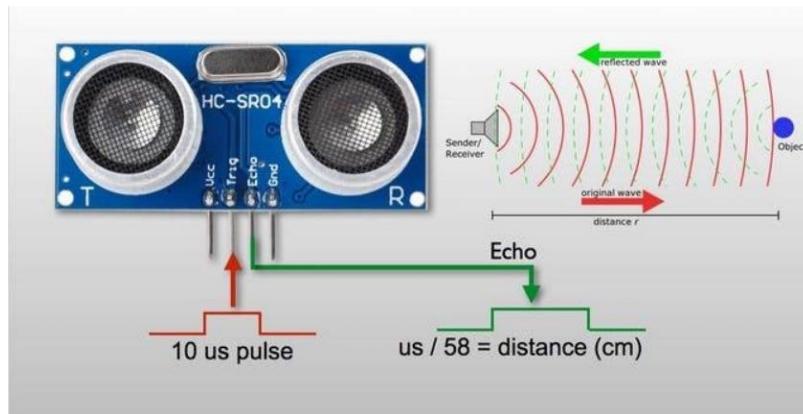


Figura 28. Funcionamiento del sensor ultrasónico [19].

Podemos encontrar dos tipos de módulos para medir distancia por ultrasonido, el interfaz mediante pulso de echo y el interfaz serial. En nuestro caso, el HC-SR04 es un sensor que utiliza el interfaz mediante el pulso echo.

La distribución de los pines del HC-SR04 es la siguiente:



Figura 29. Distribución de los pines del HC-SR04 [19].

El pin trigger recibe un pulso de habilitación de parte del microcontrolador, con el cual se le indica al módulo que comience a realizar la medición de distancia.

En el pin echo, el sensor devuelve al microcontrolador un pulso cuyo ancho es proporcional al tiempo que tarda el sonido en viajar del transductor al obstáculo y volver al módulo.

Con una fórmula matemática estimamos la distancia entre el sensor y el objeto, ya que conocemos la velocidad y el tiempo de viaje del sonido. En la siguiente imagen (Figura 30Figura 30), obtenida del manual del sensor, vemos los pulsos recibidos y enviados por el sensor.

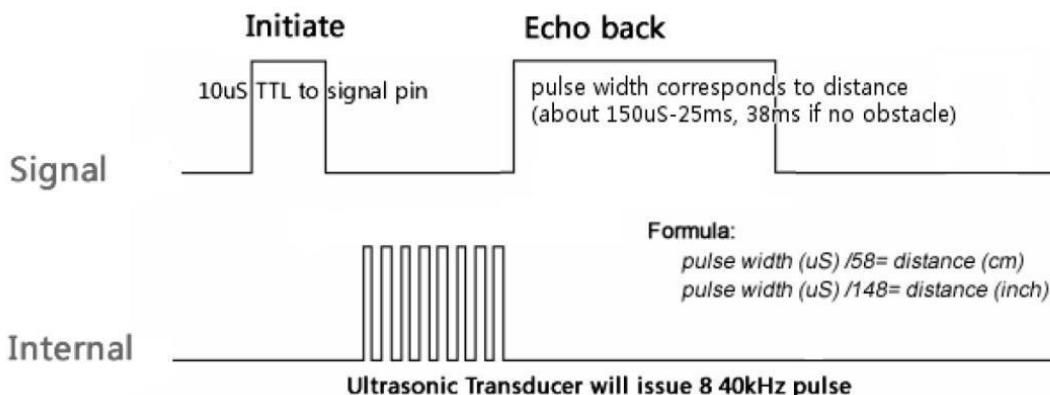


Figura 30. Pulsos recibidos y enviados por el sensor [Datasheet(Anexo VI)].

Podemos observar que el pulso echo que genera el sensor, es proporcional a la distancia medida por él. Para obtener la distancia en centímetros, hay que dividir el tiempo en micro segundos entre 58.

El sensor de ultrasonidos tiene que estar colocado por lo menos a 2 cm de lo que sería la cantidad máxima de llenado, para que pueda enviar y recibir bien las señales. Su rango de medida iría desde los 2 cm a los 5 m, pero no es aconsejable utilizarlo para distancias tan grandes.

### 6.3 Montaje del circuito eléctrico.

Para montar el circuito eléctrico, se utiliza un sensor ultrasónico HC-SR04, una placa LCD, Arduino UNO, 1 LED (rojo), 9V de alimentación (pila), placa protoboard y los correspondientes cables para las uniones. Posteriormente, se hace una placa de circuito impreso con su correspondiente encapsulado para hacerlo más real.

El sensor ultrasónico tiene 4 patillas, de las cuales 2 son de alimentación (5V y GND) que van conectadas al Arduino, en los pines correspondientes. Las otras 2 patillas son trigger y echo, que van conectadas a los pines 8 y 9 del Arduino.

La placa LCD utilizada es el modelo LM016L y tiene 16 pines. El pin 1 se conecta a masa, el pin 2 a una resistencia de  $220\ \Omega$  que va conectada a los 5V (se conecta la resistencia para evitar quemar la pantalla), el pin 3 es la alimentación del cristal líquido (VEE) o contraste, el pin 4 es la selección de registro (RS), el pin 5 es la selección de lectura o escritura (R/W), el pin 6 es para habilitar el dato y los pines del 7 al 14 son bits del dato. Para la conexión del LCD se utiliza un esquema de bus de 4 bits, los cuales van conectados a 4 pines del Arduino. En la LCD se utilizan los últimos 4 pines, es decir, 11 al 14. Y en el Arduino se conectan a los pines 5,4,3,2.

El led se conecta al pin 6 del Arduino con una resistencia en serie y la otra patilla va conectada a masa. El funcionamiento se programa en Arduino.

En la siguiente tabla podemos ver las conexiones del circuito:

*Tabla 2. Conexiones del circuito eléctrico.*

PINES ARDUINO	LCD	Sensor	Otros
2	Pin 14	x	x
3	Pin 13	x	x
4	Pin 12	x	x
5	Pin 11	x	x
6	x	x	R de $150\ \Omega$ (LED)
7	x	x	x
8	x	Trigger sensor	x
9	x	Echo sensor	x

<b>10</b>	x	x	x
<b>11</b>	Pin 6	x	x
x	Pin 5	x	GND
<b>12</b>	Pin 4	x	x
x	Pin 3	x	Potenciómetro 10kΩ
x	Pin 2	x	R de $220\ \Omega \rightarrow 5V$
x	Pin 1	GND	GND
x	x	Vcc	5V

#### 6.4 Montaje del sensor en el depósito simulado.

Una vez montado todo el circuito eléctrico, procedemos a montar el sensor para la demostración en el laboratorio; utilizando el sensor y un recipiente donde echar el agua.

El sensor lo sujetamos con unos palitos de los típicos de hacer brochetas junto con unos alambres para agarrarlos a los agujeros que lleva en las esquinas de la placa del sensor (Figura 31). Y el recipiente a utilizar va a ser un tuper de plástico de 1 litro de capacidad, con forma aparentemente cilíndrica.



Figura 31. Sensor ultrasónico con soporte casero.

Los alambres con los que se enganchan los palitos tienen que estar aislados, ya que si no la placa hace contacto con ellos y no funciona el sensor.

Como podemos observar en la Figura 32, de esta forma conseguimos un buen apoyo para poner el sensor encima del recipiente y que mida la distancia hacia el líquido de dentro.

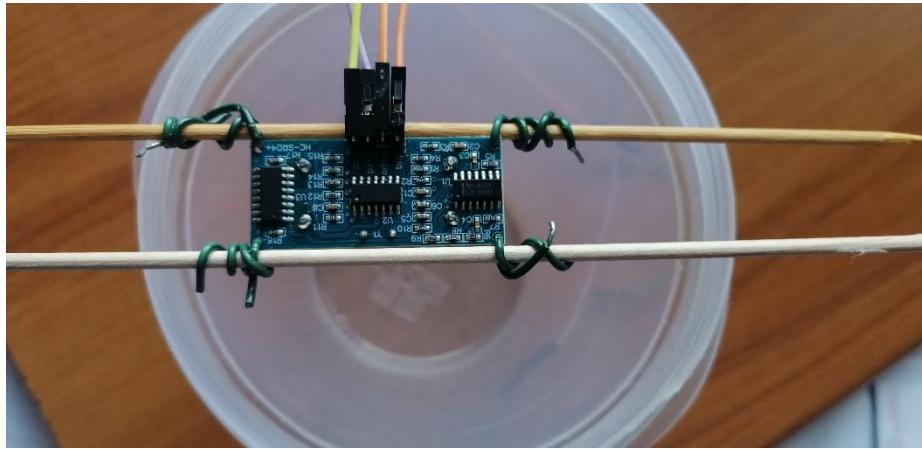


Figura 32. Sensor apoyado en el recipiente.

Para las primeras mediciones y pruebas, montamos el circuito en una placa protoboard. En la que se conecta el Arduino, la pantalla LCD, el led, el sensor y el resto de componentes necesarios para el funcionamiento, como podemos ver en la siguiente Figura 33.

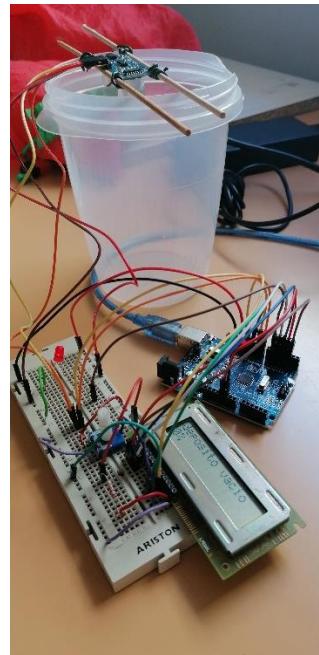


Figura 33. Montaje del circuito en protoboard.

Para el cálculo de las mediciones se ha utilizado un recipiente casi cilíndrico, que simula el depósito de agua.

## 6.5 Cálculos realizados para las mediciones.

Antes de programar el control del funcionamiento en Arduino, se han realizado unas mediciones para la correcta configuración de las rutinas.

En primer lugar, se ha medido, con el sensor, el depósito en vacío, para saber que altura hay desde donde se coloca el sensor hasta el fondo del recipiente. Y esa medida son 14,40 cm.

A continuación, se ha definido cuál es el nivel máximo del depósito. Ya que el agua no puede tocar el sensor. En este caso, se ha marcado en el recipiente una raya, haciendo la prueba con el código de lectura del sensor, hasta el momento que marcaba aproximadamente 0 en la distancia. Una vez se está demasiado cerca del sensor, se disparan los valores.

La fórmula utilizada para calcular el volumen del recipiente, a pesar de que no es cilíndrico del todo, se hace una aproximación, es la siguiente:

$$V = \pi * r^2 * altura \quad (1)$$

donde  $r$  es el radio de la base del cilindro.

La altura se ha calculado con el valor de la altura total, restándole el valor que hay desde el sensor, al agua, y así se obtiene el valor de la altura del agua.

$$Altura = Altura \text{ total} - distancia \text{ al agua} \quad (2)$$

El porcentaje se ha calculado con el valor de la altura multiplicado por 100 y dividido por la altura total del recipiente, o lo que es lo mismo, la medida del recipiente en vacío.

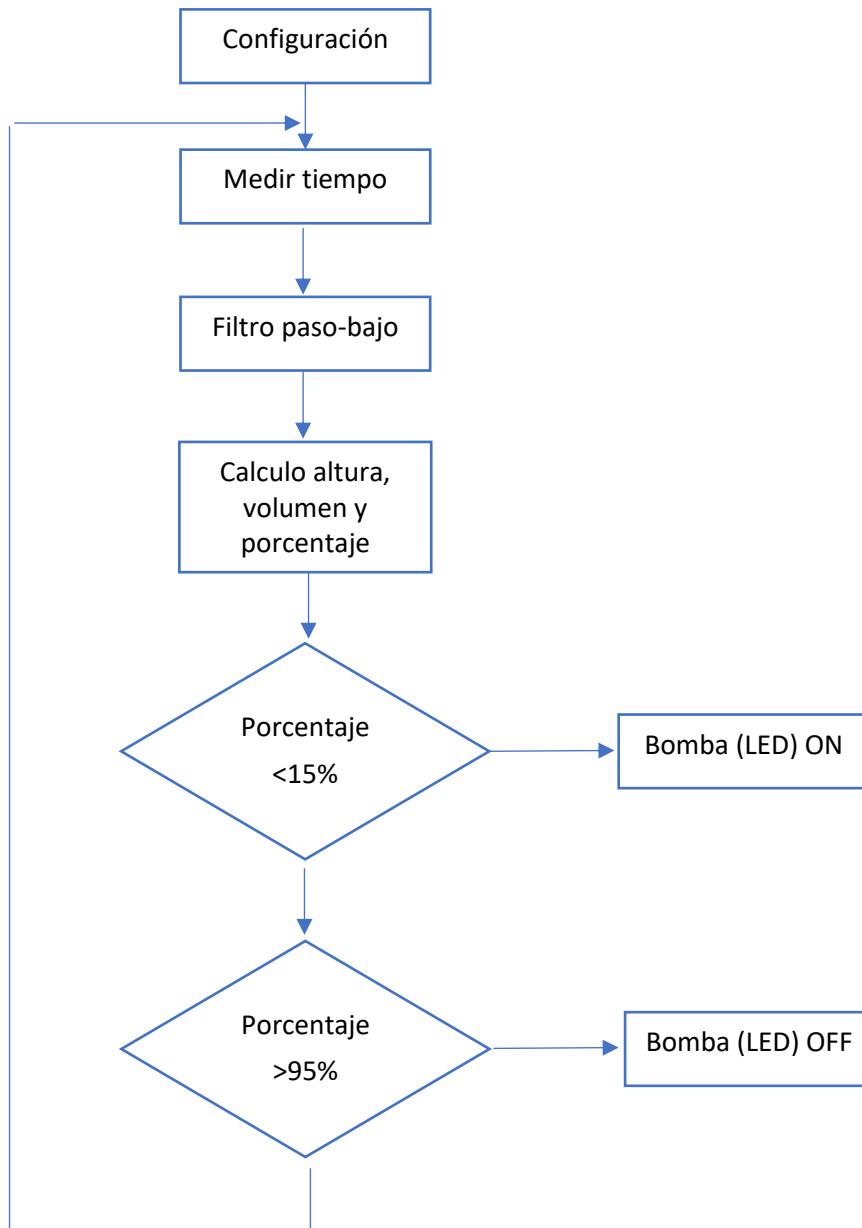
$$Porcentaje = \frac{altura}{altura \text{ total}} * 100 \quad (3)$$

## 6.6 Programación en Arduino.

El Arduino se ha programado en su entorno de programación. Se han utilizado 3 librerías externas: una para el sensor ultrasónico, otra para la pantalla LCD y otra para el controlador PID.

El código para simular este programa se encuentra en el Anexo III.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del programa y posteriormente su explicación.



En primer lugar, se han definido las constantes de la librería de la LCD para asociarlas a los pines del Arduino. También se han definido las constantes 'COLS' y 'ROWS' para definir las 16 columnas de la LCD y las 2 filas.

A continuación, se definen los pines del sensor ultrasónico: el Trigger va conectado al pin 8 del Arduino y el Echo va al pin 9. También se define el pin del LED en el Arduino que es el 6.

Luego, van a ser necesarias unas constantes para el desarrollo del programa, por lo tanto, se definen también al inicio del código. Estas constantes son la velocidad del sonido, la altura del depósito vacío, el radio medio del depósito cilíndrico y la constante  $\pi$ .

Se definen tres variables *float*: una para la distancia al agua ‘distagua’, otra para la altura que hay de agua en el depósito ‘altura’ y otra para el volumen de agua calculado ‘volumen’. Además, se define una variable *int* para el porcentaje y otra variable *unsigned long* para el tiempo.

Para el filtro paso bajo (6.7 más adelante) se definen 3 *floats* también: una para el array para almacenar la lectura, otra para la suma que la definimos como 0 y otra para la media que también la definimos como 0. Y una *const int* para definir el número de muestras.

Y respecto a las cosas relacionadas con el controlador PID, se asignan los pines de entrada y salida al Arduino, se definen las constantes del controlador: Kp, Ki y Kd, y las variables externas e internas del mismo.

A continuación, preparamos el programa para su ejecución en la función *void setup*. Aquí inicializamos el monitor serie para mostrar los resultados en la pantalla del ordenador, ponemos el pin de *Trigger* y el del *LED* en modo salida y el del *Echo* en modo entrada. Configuramos las columnas y las filas de la LCD. También inicializamos el array del filtro paso bajo, que es un bucle *for* que va desde 0 hasta el número de muestras que hemos definido y va haciendo las correspondientes lecturas. Y finalmente inicializamos el controlador PID con su pin de entrada y el Setpoint.

Seguidamente ejecutamos el programa. En primer lugar, programamos el filtro paso bajo, inicializando las variables suma y tiempo a cero. Dentro del bucle *for*, calculamos el tiempo que tarda en cambiar entre estados el sensor, con la función ‘pulseIn’. Realizamos la suma de la suma y el tiempo, para después cuando salgamos del bucle hacer la media de las sumas entre las muestras. Con el comando ‘Serial.print()’ podemos imprimir en la consola del programa las variables o palabras para ver si vamos ejecutando bien el código.

Es importante tener en cuenta que la inicialización del *Trigger* debe de estar al inicio del bucle *for* del filtro paso bajo, para que así pueda calcular el tiempo correctamente. Si no, habrá errores.

Una vez le hemos hecho el filtro paso bajo al tiempo, calculamos la distancia que hay desde el sensor al fondo del recipiente o al agua en el caso de que este lleno. Para que salga en centímetros directamente hay que convertirlo. Por lo tanto, usamos el valor del tiempo ya filtrado, lo multiplicamos por la velocidad del sonido y por 0,000001 (para convertirlo de microsegundos a segundos) y todo lo dividimos entre 2, porque queremos saber lo que le cuesta solo un viaje de ida a las ondas del sensor, no la ida y vuelta.

Con la distancia al agua calculada, ya podemos calcular la altura y con la altura el volumen. Para ello utilizamos las fórmulas explicadas en el apartado 6.5.

Para evitar que la altura salga negativa, en el caso de que hubiera algún error, la forzamos para que sea 0 si se diera el caso. Si no, el valor de la altura será el calculado en la resta. Para hacer

estas comprobaciones programamos para que salga por el monitor del programa de Arduino los valores.

Con el volumen hacemos algo parecido, ya que es sensible a las variaciones. Si el volumen es menor de 50 ml, lo forzamos a 0 y si no, muestra el valor de la variable calculado en la ecuación. Además, en este bucle *if/else*, programamos ya la primera línea de la LCD. En la que se mostrara por pantalla ‘deposito vacío’ en el caso de que el valor del volumen sea 0, o por el contrario si tiene más de 50 ml, mostrara el valor del volumen calculado.

Seguidamente, en la segunda línea de la LCD se muestra el porcentaje, que se calcula con la ecuación (3) definida en el apartado 6.5. Para que no esté continuamente cambiando y quede un poco mejor, se hace un *if/else* encadenado con el que mostrara los porcentajes de 5 en 5.

A continuación, se programa el encendido del LED, que en este caso va a simular el funcionamiento del motor de la bomba de agua. El LED se encenderá cuando el valor del porcentaje sea menor que el 15% y se apagará cuando este casi lleno el depósito, al 95 %. El LED encendido representa el motor encendido, y el LED apagado representa el motor parado.

Por último, en la ejecución del programa, hacemos el controlador PID. Leemos la entrada del controlador, calculamos el controlador y escribimos la salida del controlador. Para el cálculo del controlador obtenemos el tiempo actual, calculamos el tiempo transcurrido, determinamos el error entre la consigna y la medición, calculamos la integral y la derivada del error, calculamos la salida del PID y almacenamos el error anterior y el tiempo anterior.

Para la función de la inicialización del Trigger, ponemos el trigger en estado bajo y esperamos 2 ms. A continuación, ponemos el Trigger en estado alto y esperamos 10 ms. Y posteriormente se vuelve a poner en estado bajo. Esta función se inicia en el bucle *for*, ya que, si no, no empieza a medir el tiempo.

## 6.7 Filtro paso bajo

La utilización del filtro paso bajo es para reducir el ruido de altas frecuencias, ya que el sensor utilizado es muy sensible a ellas y se espera que el llenado del depósito sea más lento. Para atenuarlo, se filtró paso bajo el tiempo medido, provocando el mismo efecto en la altura al estar relacionada con el tiempo de forma lineal e invariante en el tiempo.

La realización del filtro ha consistido en poner un bucle *for*, que toma 5 muestras del tiempo y calcula su promedio, para utilizarlo posteriormente en el cálculo de la distancia al agua.

## 6.8 Control PID

Se ha añadido también un control PID al código para controlar el llenado mediante una electroválvula analógica. Si bien el problema/simulación no la incluye, es una funcionalidad muy interesante en un programa de control de nivel de depósitos.

En la parte de simulación, no se ha podido implementar, pero está programado por si en un futuro se pudiera. Donde sí se ha implementado es en el prototipo físico.

El funcionamiento del PID consiste en leer la entrada analógica y escribir la salida del controlador. Para ello, obtenemos el tiempo actual en milésimas de segundo, calculamos el tiempo transcurrido, determinamos el error entre la consigna y la medición. A continuación, calculamos la integral y la derivada del error. Posteriormente se calcula la acción a aplicar, que es proporcional al error, a su integral, y a su derivada con diferentes factores de proporcionalidad que deben configurarse en función de las especificaciones (error en régimen permanente, tiempo de respuesta, sobreoscilación máxima, etc.) del problema específico.

## 6.9 Diseño de la placa

Para hacer las conexiones del circuito eléctrico y evitar que haya demasiados cables que puedan generar problemas, se ha diseñado una placa. La finalidad es hacer las conexiones con el mínimo número de cables y que quede mejor conectado.

Para el diseño de la placa, se ha utilizado el programa EAGLE, previamente visto en la asignatura de Diseño Electrónico. Con este programa, se diseña la parte esquemática del circuito, que la podemos ver a continuación en la siguiente figura.

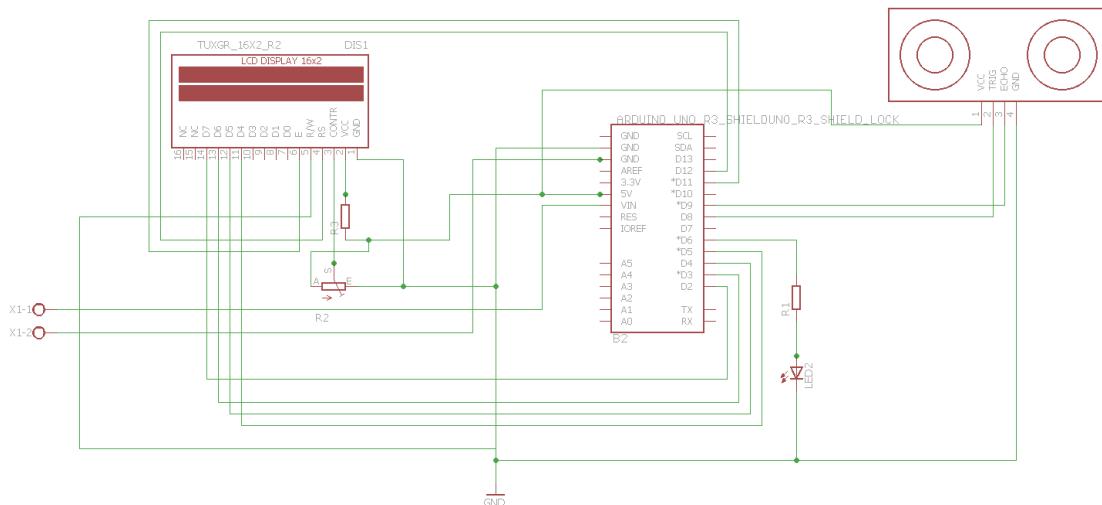


Figura 34. Esquemático del circuito electrónico.

Una vez creado el esquemático, hay que crear el archivo board, donde diseñaremos la placa para posteriormente imprimirla. Hay que reordenar los componentes y hacer las conexiones de los pines.

En este caso se han realizado las conexiones en la parte top y en la bottom, es decir, por arriba y por abajo, ya que así lo requería el posterior montaje. Eso quiere decir que hay componentes

que irán soldados en la parte de arriba, y componentes que estarán soldados en la parte de abajo. Para cambiar de la parte top a la bottom, se han utilizado vías.

Cuando está preparado diseño de la placa en el fichero board, hay que comprobar que todas las conexiones sean correctas y que a la hora de imprimirla no haya pads que se junten con conexiones incorrectas. La anchura de las líneas de conexión es de 1 mm, salvo en algún caso que pasa entre pads y es necesario ponerla más estrecha. A continuación (Figura 35), se muestra cómo queda el board que posteriormente pasará a imprimirse.

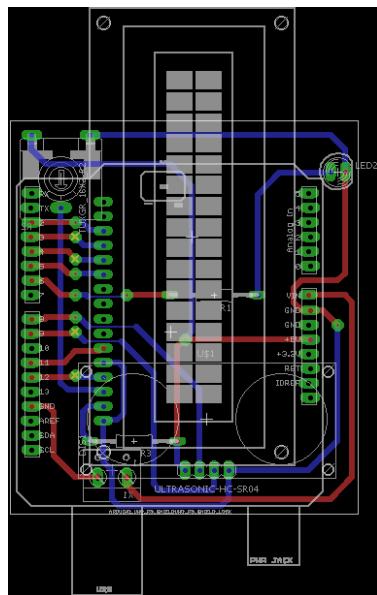


Figura 35. Diseño de la placa board.

Como podemos ver, las líneas azules serían las de la parte bottom, es decir, las que van por debajo de la placa, cuyos componentes estarían por arriba y se sueldan por abajo. Y las líneas rojas, son las de la parte top, que se quedan por arriba en la placa, cuyos componentes se quedan abajo y se sueldan por arriba, en nuestro caso el Arduino.

Para facilitar la soldadura, se han puesto todos los pads de forma alargada, con un diámetro más grande del que viene por defecto en las librerías de los componentes. Los agujeros del taladro, van de los 0,8 mm a los 1,2 mm, para que las patillas quepan adecuadamente a la hora de soldar.

Las vías, que son las conexiones donde hay un cambio de la pista de arriba a la de abajo, se han diseñado circulares, con diámetro más grande del que viene por defecto.

Una vez impresa la placa (Figura 36), se prepara para la soldadura el estaño y el soldador. Lo primero que se suelda son las vías, ya que es lo que menos altura le va a dar a la placa. A continuación, los pines para conectar al Arduino (Figura 38). Una vez soldados, se comprueba que encajen adecuadamente (Figura 37Figura 37). Luego las resistencias, ya que tampoco le dan mucha altura a la placa. Seguidamente el potenciómetro y el LED, junto con los cables para conectar la pila de 9V. Y, por último, una vez comprobadas todas las conexiones y que todo está

bien soldado, se suelda la pantalla LCD, ya que es lo más frágil y más difícil de desoldar, en el caso de que hubiera que hacerlo.

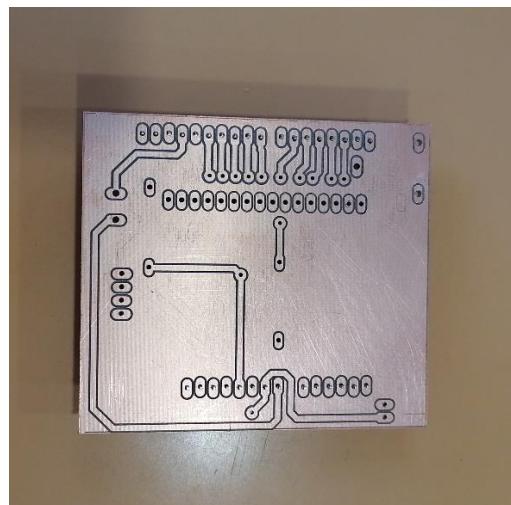


Figura 36. Placa impresa por la cara de arriba (top).



Figura 37. Comprobación de pines de la placa en el Arduino.

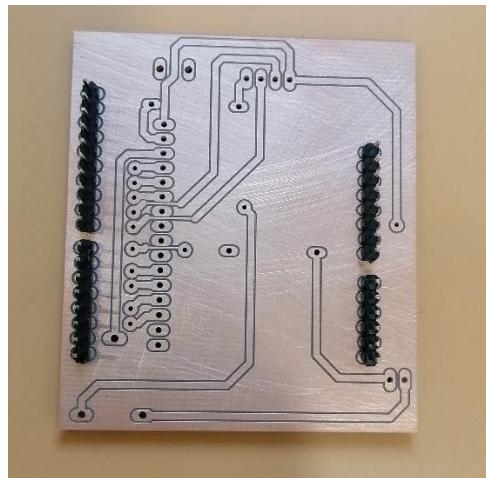


Figura 38. Pines soldados para conectar al Arduino.

Por último, se muestra la placa con todos los componentes soldados (Figura 39 y Figura 40)! **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El objetivo de tener menos cables que en el circuito eléctrico montado anteriormente en la protoboard, se ha cumplido.

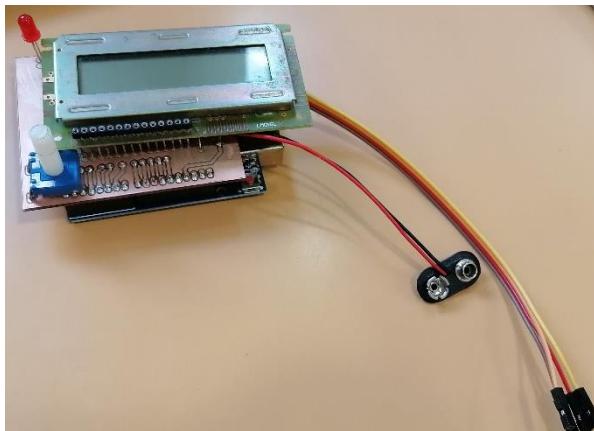


Figura 39. Placa vista desde arriba con los componentes y cables para batería y sensor.



Figura 40. Placa vista desde el lado con los componentes soldados.

Se han soldado varios cables: un par para la alimentación del Arduino (pila de 9V) y 4 cables para conectar el sensor ultrasónico. Los cables se han soldado con un elemento llamado macarrón termorretractil (Figura 41), que con el calor se hace más pequeño, así aísla los puntos de soldadura y evita que se junten unos cables con otros. Una vez se enfriá, mantiene la forma que se ha quedado cuando se le ha dado calor.



Figura 41. Macarrón termorretractil.

Los archivos del diseño de la placa se encuentran en el Anexo IV.

#### 6.10 Diseño del encapsulado.

Se diseña un encapsulado para meter la placa, el Arduino y la pila. En el que se deja a la vista la pantalla LCD, el LED, el mando del potenciómetro y el interruptor On/Off de la pila. Además, se dejan dos orificios en el lateral, para la conexión con el ordenador por cable y los cables que van al sensor.

El diseño se realiza con el programa FreeCAD, utilizado anteriormente en la asignatura de Tecnologías de Fabricación. Es un programa para hacer diseños de figuras en 3D y posteriormente imprimirlas con la impresora 3D.

Antes de realizar los bocetos con el programa, se hacen unos croquis para saber las medidas necesarias. El encapsulado consiste en dos piezas: una caja abierta por arriba, donde se van a meter todos los componentes, con los orificios en el lateral para los cables; y una tapa, hecha a medida, para los componentes que se van a ver.

En la siguiente figura podemos ver el croquis del encapsulado, en planta, alzado y perfil. Está hecho de lo que sería la figura entera, sin dividir en dos partes, ya que la planta sería la tapa y la caja se ve en el alzado y el perfil.

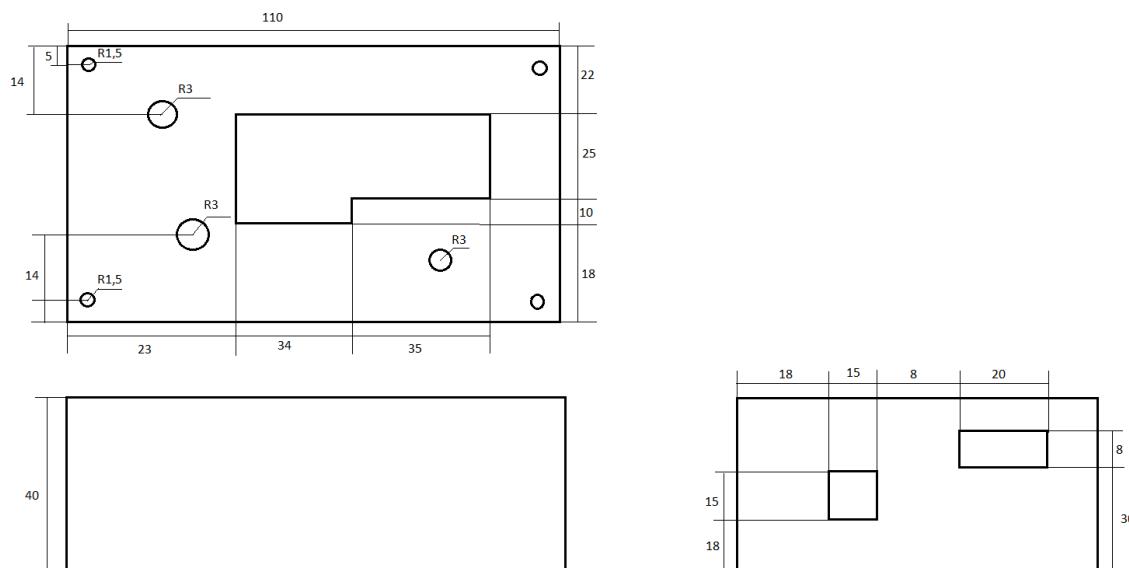


Figura 42. Croquis del encapsulado.

Una vez se tienen las medidas de las distancias y los huecos, ya se hace el diseño del encapsulado en FreeCAD. Trabajamos en la zona de trabajo ‘Part’. Para la parte del cubo, se hace un cubo con las medidas de 110 mm de largo, 75 mm de ancho y 40 mm de alto. Se hace una extrusión de 5 mm para que se quede hueco, con las paredes de 5 mm de espesor.

En la pared de la derecha, de 75 x 40 mm, se sitúan los dos huecos para los cables. Uno de ellos es un cuadrado de 15 x 15 mm para el cable que conecta el Arduino con el ordenador. El otro es un rectángulo de 20 x 8 mm, el cual se utiliza para los cables que van al sensor ultrasónico.

En la siguiente figura podemos ver la vista en 3D del diseño en el programa.

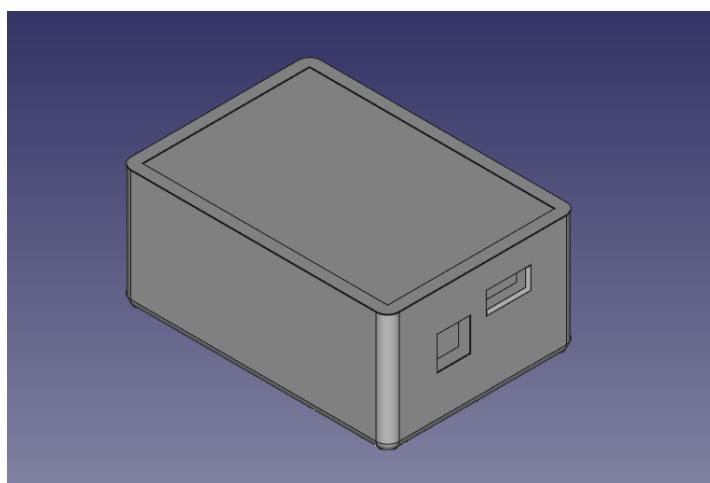


Figura 43. Diseño 3D caja encapsulado.

Para la tapa de la caja, se ha hecho con las mismas medidas que la caja, 110 mm de largo, 75 mm de ancho y 5 mm de altura. En esta se han hecho 4 agujeros en las esquinas para los tornillos que usamos para cerrar el encapsulado y hacerlo todo en una pieza. También se ha dejado el hueco para la pantalla LCD, con el correspondiente hueco para testear los pines si hiciera falta.

Hay también hueco para tres circunferencias de 3 mm de radio, una para el LED, otra para regular el potenciómetro, con el que se regula la intensidad de la LCD, y otra para el interruptor que enciende la pila para darle tensión al Arduino.

En la Figura 44 podemos ver el diseño 3D en el programa FreeCAD de la tapa.

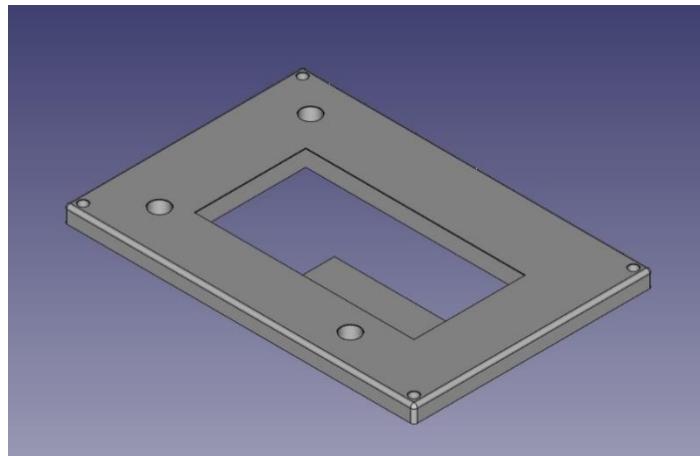


Figura 44. Diseño 3D de la tapa del encapsulado.

Una vez hecho el diseño del encapsulado, antes de imprimirla en 3D, se hace una prueba con cartón. A ver si son correctas las medidas. Para ello se hacen la planta, alzado y perfil y se comprueba que todo encaje. En las Figura 45 y Figura 46 podemos ver como todo es correcto.

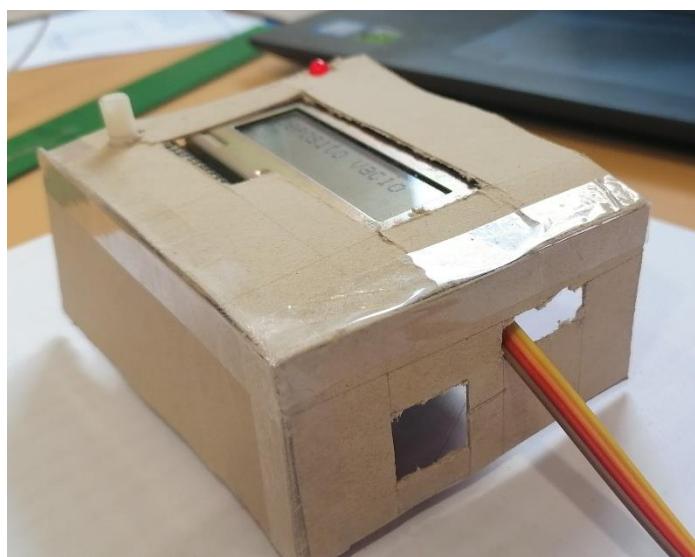


Figura 45. Encapsulado de cartón, vista 3D.



Figura 46. Encapsulado en cartón, visto desde arriba.

Cuando se ha comprobado que las medidas son las correctas y que encaja todo como tiene que ser, se prepara para la impresión 3D. Para ello hay que generar los ficheros para enviarlos al programa Ultimaker Cura, que es el programa que se utiliza para la impresión con la impresora 3D. Desde FreeCAD se exportan las figuras como archivo .stl y posteriormente ese archivo se abre desde Ultimaker Cura, se ajustan los parámetros para la impresión. Se selecciona la impresora que se va a utilizar, en este caso una de la marca BQ, modelo Witbox 2.

Al ajustar los parámetros, presionamos el botón Slice, para que calcule el tiempo estimado de la impresión y genere los ficheros gcode (Figura 47). Estos ficheros, se guardan en una tarjeta SD para posteriormente introducirla en la impresora y desde ahí imprimir los archivos.

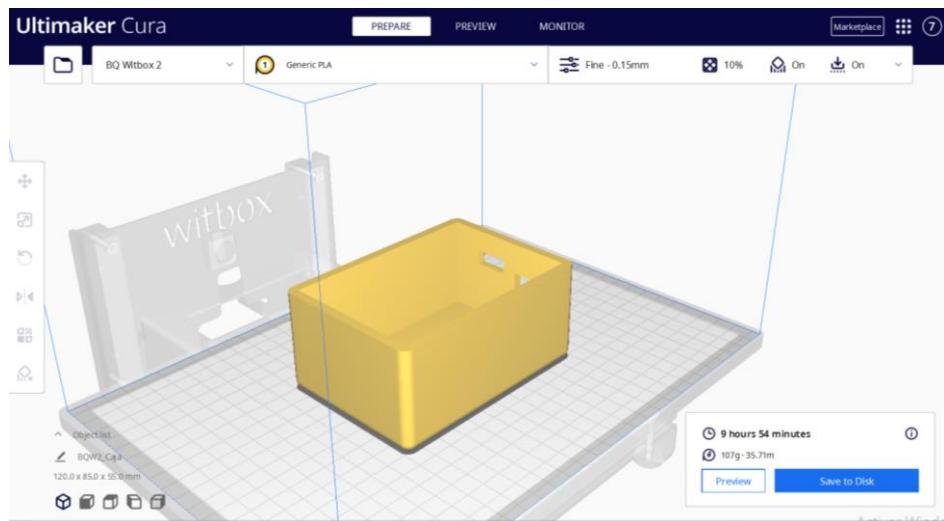


Figura 47. Generación de ficheros gcode en Ultimaker Cura.

Una vez tenemos esto generado, guardamos el fichero gcode. También podemos ver la simulación de cómo se hará la pieza, desde el programa (Figura 48). Desde las zonas redondeadas en la siguiente Figura 48, se puede seleccionar la capa que se desea mostrar, desde la barra de la derecha.

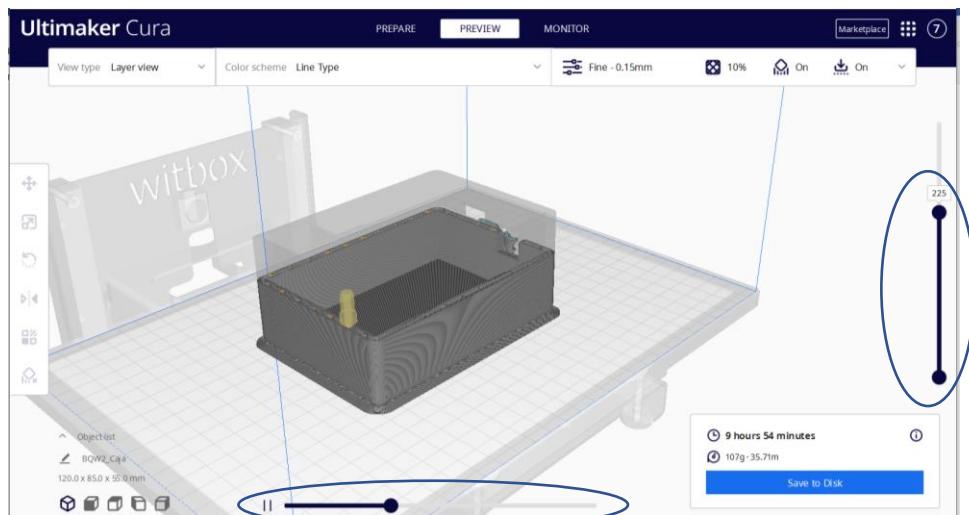


Figura 48. Simulación en Cura de la impresión de la pieza.

Mientras tanto, en la impresión real, puede haber imprevistos, como que la pieza no se haga bien a la primera. Ese ha sido el caso, ya que el primer intento (Figura 49), se levantó la base, y empezó a ondularse la figura. Por lo tanto, hubo que pausar la impresión para quitarla y empezarla de nuevo.

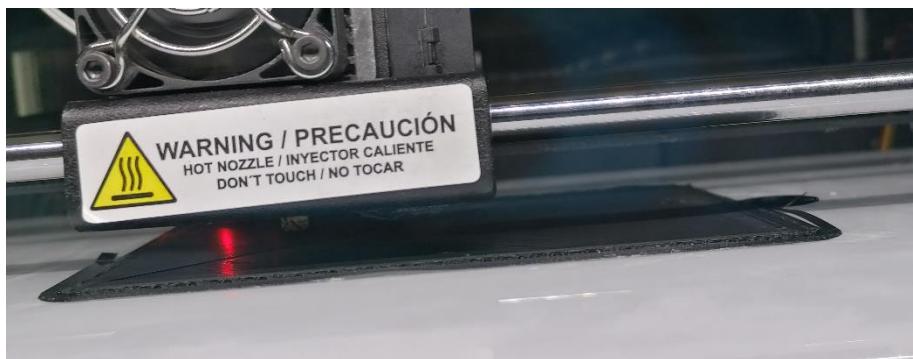


Figura 49. Inicio del primer intento impresión 3D del encapsulado.

Para el segundo intento de la impresión, se añade un poco de pegamento a la base, para que así la pieza no se mueva. Se hace solamente en el contorno de la figura para que luego quede un acabado más bonito.

A continuación, en la Figura 50, se puede ver cómo va avanzando la impresión.

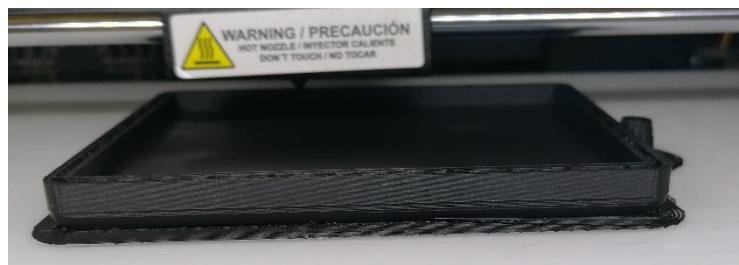


Figura 50. Progreso de la impresión 3D de la caja del encapsulado.

En la Figura 51 podemos ver la caja del encapsulado al 70 % de su impresión. En la Figura 52 podemos ver la caja ya terminada. En la Figura 53 se puede observar el árbol que deja la forma de realizar esta impresión.

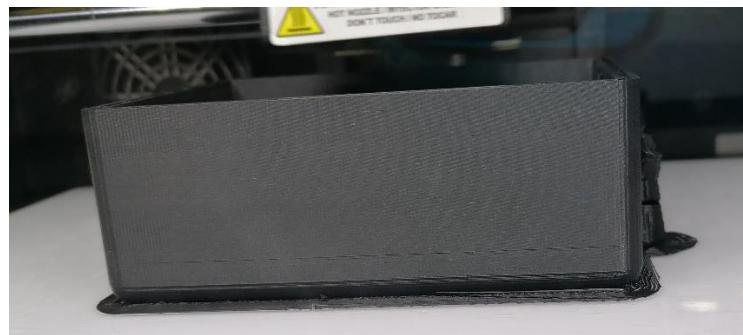


Figura 51. Caja del encapsulado impresa al 70%.

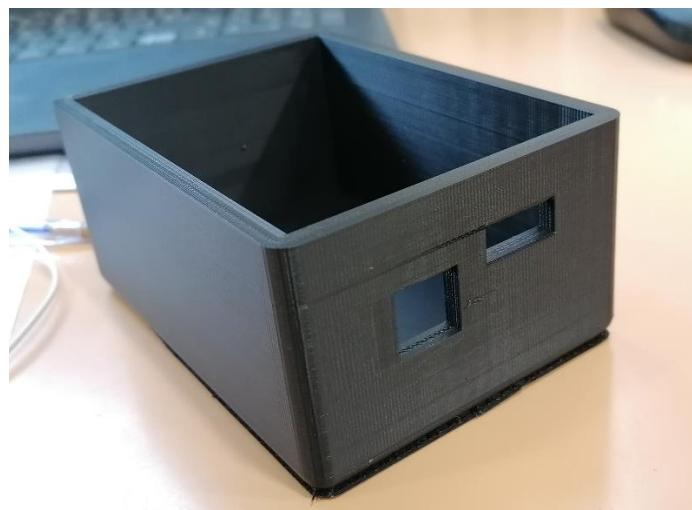


Figura 52. Caja del encapsulado terminada.

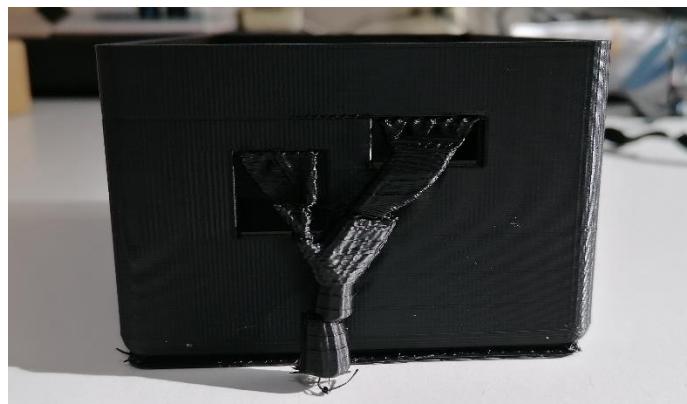


Figura 53. Lado del encapsulado donde se ve la forma de árbol al imprimir.

Para la impresión de la tapa se ha realizado el mismo proceso. A continuación, se muestra en la Figura 54 la impresión al 50 % aproximadamente, en la que se puede ver cómo se queda el

interior de la pieza. De esta forma, la pieza es más ligera y, además, se gasta menos plástico. Aparte se rebaja el tiempo de impresión.



Figura 54. Tapa del encapsulado al 50 % de su impresión.

En la Figura 55 vemos ya la tapa terminada, preparada para su montaje.



Figura 55. Tapa del encapsulado impresa en 3D.

### 6.11 Montaje del encapsulado.

Una vez impresas todas las partes diseñadas para el encapsulado, se realiza su montaje (Figura 56).



Figura 56. Encapsulado.

Este montaje se ha realizado, como se ha dicho anteriormente, para tener una caja protectora de los componentes y que visualmente quede más bonito. Dentro de él, se encuentra una pila de 9V, un Arduino UNO, la placa diseñada para el circuito eléctrico y todas las conexiones de los cables que salen al exterior. Además, el encapsulado tiene un pequeño orificio para poder conectar el cable de datos y alimentación para conectar el Arduino al ordenador.

Los archivos del diseño del encapsulado y de la impresión en 3D, se encuentran en el Anexo V.

### 6.12 Puesta en funcionamiento de la maqueta.

Una vez terminado el encapsulado y comprobado que encaja todo, se pone en funcionamiento. Se ha añadido un interruptor a la pila, para poder encender y apagar sin necesidad de desconectar el cable de la pila, ya que eso implicaría abrir el encapsulado.

Se realizan las conexiones de los 4 cables que salen del encapsulado y van al sensor ultrasónico. Se prueba si el prototipo funciona. Una de las pruebas realizadas se puede ver en la siguiente figura.

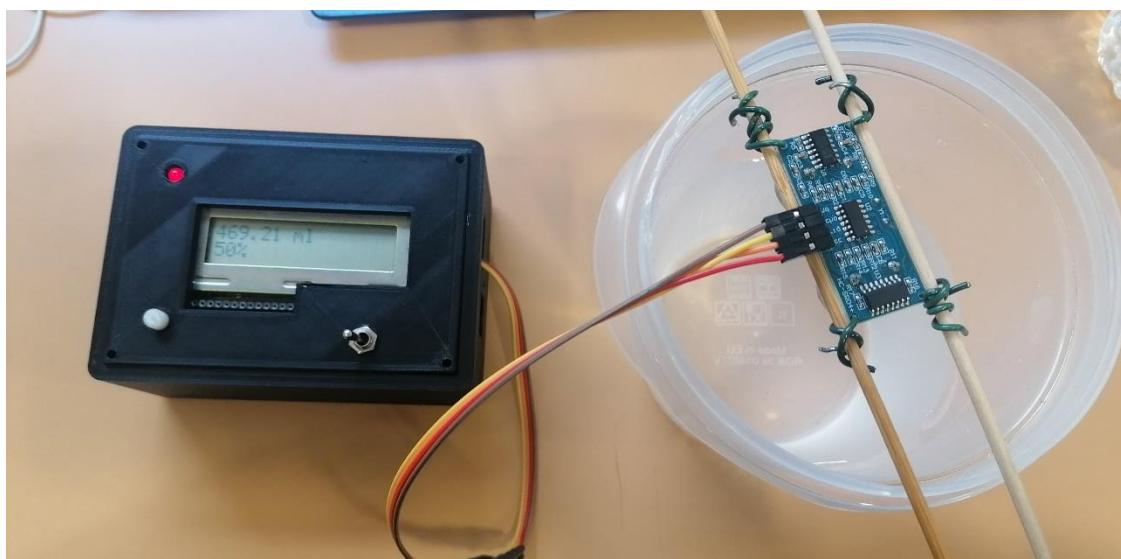


Figura 57. Puesta en funcionamiento del modelo.

Como podemos ver, el cable marrón va a GND, el rojo a Vcc, el naranja a Trigger y el amarillo a Echo. En la figura anterior, se ha llenado medio depósito de agua, y vemos en la LCD que hay aproximadamente medio litro e indica que está al 50 %.

También se han realizado más mediciones con el 20 %, 80 %, etc. En ellas se observa que le cuesta un poco indicar el valor al instante. Esto se debe a que el filtro pasa bajo, realiza 5 mediciones para hacer la media, por lo que le cuesta unos segundos hasta que se actualiza el valor en la LCD. Sin embargo, si conectamos el Arduino al ordenador y le mandamos el programa desde ahí, abriendo el monitor serie; ahí sí que se pueden observar los valores al instante.

En la siguiente tabla, se muestran los precios aproximados de lo que ha costado realizar el prototipo:

Tabla 3. Coste del prototipo.

Elemento	Coste	Referencias
Arduino	23,20 €	[20]
LCD	16,01 €	[21]
LED	0,46 €	[22]
Placa electrónica	2 €	

Potenciómetro	1 €	
Resistencias x2	0,05 €	[23]
Interruptor	5,86 €	[24]
Pila 9V	5,19 €	[25]
Sensor ultrasónico	2,39 €	
Cables	0,60 €	[26]
Encapsulado	2,52 €	
Recipiente + palitos + alambres	1 €	
<b>TOTAL</b>	<b>60,28 €</b>	

En la mayoría de los componentes se han obtenido los precios en la página de 'RS' y el encapsulado y la placa preguntando en la universidad a los responsables.

Teniendo en cuenta que una bobina de 1kg de cable de plástico para la impresora 3D vale 20 €, se consulta en el programa cura cuanto pesa cada pieza y de ahí se obtiene el valor. La caja pesa 107 g y la tapa pesa 19 g, por lo tanto, el encapsulado pesa 126 g. Haciendo una simple regla de tres, se obtiene que el coste del encapsulado ha sido de 2,52 € (solo material, sin contar ni electricidad ni repeticiones, en este caso sólo una).

El precio total aproximado del prototipo es de 60 €.

## 7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

### 7.1 Principales conclusiones del trabajo realizado

Las conclusiones a las que nos lleva este trabajo son que gran parte de las cosas que nos rodean se pueden automatizar, ya bien para mejorar su funcionamiento o para ahorrar tiempo.

Este trabajo se ha hecho a pequeña escala, pero podría implementarse para un depósito grande. Aun así, el prototipo desarrollado va a servir para poder realizar prácticas en alguna asignatura del ámbito de la automatización.

Además, se han utilizado conocimientos de varias asignaturas vistas a lo largo del grado, como Sistemas Automáticos, Automatización Industrial, Ingeniería de Control, Electrotecnia, Electrónica, Diseño Electrónico, Tecnologías de Fabricación...

Este proyecto se podría implementar en un depósito de mayor escala, cambiando el sensor y adaptándolo a las necesidades de las características del depósito que lo requiera.

Aunque la idea principal del proyecto no se ha podido implementar, se ha realizado la automatización de un depósito de agua. De este modo, se consiguen los objetivos planteados al inicio, pero adaptados a un escenario diferente.

## 7.2 Limitaciones que ha tenido el TFG

Las limitaciones que ha tenido el TFG han sido, entre otras, que no se ha podido implementar físicamente en el depósito real. No obstante, precisamente por eso se ha podido hacer en el laboratorio simulado y, así posteriormente, va a servir para prácticas en alguna asignatura del Grado.

El sensor ultrasónico no es apto para grandes distancias, por lo que es útil para la maqueta del depósito, pero para uno más grande sería necesario utilizar otro sensor, como los que se han mencionado en la búsqueda de sensores.

Otra gran limitación es que no se envían los datos de llenado del depósito a un servidor, sino que se ven en local. Los datos solamente se muestran por pantalla, ya sea la LCD o el monitor serie, pero no se guardan.

## 7.3 Líneas de trabajo futuro.

Para mejorar la simulación, se podría añadir otro depósito que simulase el pozo y que estuviera conectado al depósito del agua de consumo con una tubería, en nuestro caso un tubo de goma, por ejemplo. Se podría conectar un pequeño motor, para poder hacer la simulación real. Así, con eso, se podría implementar el control PID, ya que estaría todo automatizado. Otra posibilidad también sería medir el caudal y en función de cuánta agua necesite, regular el caudal que introdujese la bomba desde el pozo.

Para mejorar los problemas de los cortes en el suministro eléctrico, podría ponerse una batería que alimente la bomba que sube agua del pozo. Habría otra en la zona del depósito, para así no perder la comunicación pozo-depósito.

## 8 REFERENCIAS

- [1] Aguas de Teruel, “Consumo de agua Corbalán.” [Online]. Available: <https://www.aguasdeteruel.es/Empresa/Inicio/>
- [2] “Sensor de nivel de agua flotador.” <https://bombasdeaguade.com/sensor-de-nivel-de-agua-flotador/> (accessed Mar. 31, 2022).
- [3] “Sensor hidrostático.” <https://www.directindustry.es/prod/kobold-instrumentation/product-8996-483680.html> (accessed Mar. 31, 2022).
- [4] “Sensor radar.” <https://www.foodnewslatam.com/inocuidad/53-control-calidad/6428-vegapuls-64,-el-sensor-radar-para-líquidos.html> (accessed Mar. 31, 2022).
- [5] “Sensor radar guiado.” <https://www.sensoresdepresion.top/2020/08/como-funciona-un-sensor-de-radar-guiado.html> (accessed Mar. 31, 2022).
- [6] “Sensor por ultrasonidos.” <http://www.superrobotica.com/s320112.htm> (accessed Mar. 31, 2022).

- [7] “¿Como elegir un sensor de nivel?” <https://guide.directindustry.com/es/que-sensor-de-nivel-elegir/> (accessed Mar. 11, 2022).
- [8] “Sensor capacitivo.” <https://leantec.es/tienda/ljc18a3-b-j-dz-1-10mm-capacitance-proximity-sensor-capacitivo-npn-dc-6-36v-300ma/> (accessed Mar. 31, 2022).
- [9] “Sensor de agua por presion.” <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-presion/sensores-de-presion-sumergibles/> (accessed Mar. 31, 2022).
- [10] “Sensor de presión.” <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-presion/sensores-de-presion-sumergibles/> (accessed Mar. 31, 2022).
- [11] “Sensor por burbujeo (ejemplo).” <https://automatismoindustrial.es.tl/M-e2-todo-por-burbujeo.htm> (accessed Mar. 31, 2022).
- [12] “Sensor conductivo.” <https://www.automation24.es/sensor-de-nivel-de-un-punto-conductivo-endress-hauser-liquipoint-t-ftw31-a1a3ca0a> (accessed Mar. 31, 2022).
- [13] “Sondas de nivel para depositos de agua.” <https://depositosdeagua.top/sondas-de-nivel-para-depositos-de-agua/> (accessed Mar. 11, 2022).
- [14] “Tipos de sensores de nivel.” <https://solarti.es/placas-solares/que-es-un-interruptor-o-sonda-de-nivel/> (accessed Mar. 11, 2022).
- [15] “El interruptor o sonda de nivel.” <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-interruptor-o-sonda-de-nivel> (accessed Mar. 11, 2022).
- [16] “Sensor de nivel para depósitos.” <https://depositosdeagua.top/sensor-de-nivel-de-agua-para-depositos/>
- [17] “Definiciones sensores.” <https://domoticaintegrada.com/sensor-de-agua/> (accessed Mar. 31, 2022).
- [18] “Definición de transductor.” <https://es.wikipedia.org/wiki/Transductor#:~:text=Un%20transductor%20es%20un%20dispositivo,con%20respecto%20a%20un%20generador.> (accessed Jun. 09, 2022).
- [19] G. Factory, “HC-SR04 con Arduino: Sensor de distancia ultrasonico.” <https://www.geekfactory.mx/tutoriales-arduino/hc-sr04-con-arduino-sensor-de-distancia-ultrasonico/> (accessed May 08, 2022).
- [20] “Arduino.” [https://es.rs-online.com/web/p/arduino/7697409?cm\\_mmc=ES-PLA-DS3A-\\_google\\_-CSS\\_ES\\_ES\\_Raspberry\\_Pi\\_%26\\_Arduino\\_y\\_Modulos\\_de\\_Desarrollo\\_Whoop--\(ES:Whoop!\)+Arduino-\\_7697409&matchtype=&pla-341920527054&gclid=Cj0KCQjwntCVBhDdARIsAMEwACkGLf3rMLWDJS2xxle0k4tMhErkdwmDGj43J6CdZCpJ0WkNKF6UaHUaAkDgEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://es.rs-online.com/web/p/arduino/7697409?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_google_-CSS_ES_ES_Raspberry_Pi_%26_Arduino_y_Modulos_de_Desarrollo_Whoop--(ES:Whoop!)+Arduino-_7697409&matchtype=&pla-341920527054&gclid=Cj0KCQjwntCVBhDdARIsAMEwACkGLf3rMLWDJS2xxle0k4tMhErkdwmDGj43J6CdZCpJ0WkNKF6UaHUaAkDgEALw_wcB&gclsrc=aw.ds) (accessed Jun. 23, 2022).
- [21] “LCD.” [https://es.rs-online.com/web/p/displays-monocromos-lcd/1631920?cm\\_mmc=ES-PLA-DS3A-\\_google\\_-CSS\\_ES\\_ES\\_Displays\\_y\\_Optolectronica\\_Whoop--\(ES:Whoop!\)+Displays+Monocromos+LCD+\(2\)-\\_1631920&matchtype=&pla-421464541351&gclid=Cj0KCQjwntCVBhDdARIsAMCn\\_XNnJ3rcpFAeUT5zswIZSBAI78zv1y41gBJCk\\_GWEh9Y39lnf5I4aAvlfEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://es.rs-online.com/web/p/displays-monocromos-lcd/1631920?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_google_-CSS_ES_ES_Displays_y_Optolectronica_Whoop--(ES:Whoop!)+Displays+Monocromos+LCD+(2)-_1631920&matchtype=&pla-421464541351&gclid=Cj0KCQjwntCVBhDdARIsAMCn_XNnJ3rcpFAeUT5zswIZSBAI78zv1y41gBJCk_GWEh9Y39lnf5I4aAvlfEALw_wcB&gclsrc=aw.ds) (accessed Jun. 23, 2022).
- [22] “LED.” <https://es.rs-online.com/web/p/leds/2285988> (accessed Jun. 23, 2022).

- [23] “Resistencias.” <https://es.rs-online.com/web/p/resistencias-de-montaje-en-orificio-pasante/0131794> (accessed Jun. 23, 2022).
- [24] “Interruptor.” <https://es.rs-online.com/web/p/interruptores-de-palanca/0394443> (accessed Jun. 23, 2022).
- [25] “Pila 9V.” <https://www.carrefour.es/pila-alcalinas-ultra-plus-9v-6lr61/367765538/p> (accessed Jun. 23, 2022).
- [26] “Cables.”  
[https://es.aliexpress.com/item/1005002046765371.html?\\_randl\\_currency=EUR&\\_randl\\_shipto=ES&src=google&memo1=freelisting&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&slnk=&plac=&mtcp=&albbt=Google\\_7\\_shopping&glsrc=aw.ds&albagn=888888&ds\\_e\\_adid=473728314619&ds\\_e\\_matchtype=&ds\\_e\\_device=c&ds\\_e\\_network=u&ds\\_e\\_product\\_group\\_id=303050940885&ds\\_e\\_product\\_id=es1005002046765371&ds\\_e\\_product\\_merchant\\_id=107453687&ds\\_e\\_product\\_country=ES&ds\\_e\\_product\\_language=es&ds\\_e\\_product\\_channel=online&ds\\_e\\_product\\_store\\_id=&ds\\_url\\_v=2&albcn=11405488241&albag=115612532150&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&gclid=Cj0KCQjwntCVBhDdARIsAMEwACm2uOgs5GKzR\\_NCKXa1jNA\\_dM-qg5leUujzC6BUbvdgUAwhyR79IK8aAv\\_pEALw\\_wcB&aff\\_fcid=53d1ce54ab0f4e79bd11b609bafb803c-1656017533995-04588-UneMJZVf&aff\\_fsk=UneMJZVf&aff\\_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff\\_trace\\_key=53d1ce54ab0f4e79bd11b609bafb803c-1656017533995-04588-UneMJZVf&terminal\\_id=236da84b0af54b12a122e254ede2c485&afSmartRedirect=y](https://es.aliexpress.com/item/1005002046765371.html?_randl_currency=EUR&_randl_shipto=ES&src=google&memo1=freelisting&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&slnk=&plac=&mtcp=&albbt=Google_7_shopping&glsrc=aw.ds&albagn=888888&ds_e_adid=473728314619&ds_e_matchtype=&ds_e_device=c&ds_e_network=u&ds_e_product_group_id=303050940885&ds_e_product_id=es1005002046765371&ds_e_product_merchant_id=107453687&ds_e_product_country=ES&ds_e_product_language=es&ds_e_product_channel=online&ds_e_product_store_id=&ds_url_v=2&albcn=11405488241&albag=115612532150&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&gclid=Cj0KCQjwntCVBhDdARIsAMEwACm2uOgs5GKzR_NCKXa1jNA_dM-qg5leUujzC6BUbvdgUAwhyR79IK8aAv_pEALw_wcB&aff_fcid=53d1ce54ab0f4e79bd11b609bafb803c-1656017533995-04588-UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=53d1ce54ab0f4e79bd11b609bafb803c-1656017533995-04588-UneMJZVf&terminal_id=236da84b0af54b12a122e254ede2c485&afSmartRedirect=y) (accessed Jun. 23, 2022).