



Universidad Complutense de Madrid



Universidad Nacional de Educación a
distancia

MÁSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y CONTROL

Trabajo Fin de Máster

SISTEMA DE GESTIÓN DE RIEGO BASADO EN TECNOLOGÍA DE CÓDIGO ABIERTO

Autor: Fernando Milla Utrilla

Directores: Jesús Chacón y Eva Besada

Septiembre 2020

ÍNDICE

1.	Introducción.....	1
1.1.	IOT aplicado a la agricultura.....	1
1.2.	Motivación del proyecto.....	2
1.3.	Objetivos y alcance.....	4
1.4.	Descripción general.....	4
2.	Descripción del proyecto.....	6
2.1.	Funcionamiento del sistema.....	6
2.2.	Subsistema de extracción de agua.....	7
2.3.	Subsistema de riego.....	9
2.4.	Subsistema de monitorización y control remoto.....	10
2.5.	Subsistema de suministro eléctrico.....	12
2.5.1.	Instalación fotovoltaica para la extracción de agua.....	12
2.5.2.	Instalación fotovoltaica para el sistema de riego.....	14
3.	Automatización de sistema.....	18
3.1.	Sistema de extracción de agua.....	18
3.1.1.	Especificación funcional.....	18
3.1.2.	Componentes.....	19
3.1.3.	Estructura e interconexiones.....	21
3.1.4.	Funcionamiento.....	22
3.1.5.	Resultado.....	26
3.2.	Sistema de riego.....	28
3.2.1.	Especificación funcional.....	29
3.2.2.	Componentes.....	29
3.2.3.	Estructura e interconexiones.....	31
3.2.4.	Funcionamiento.....	32
3.2.5.	Resultado.....	34
4.	Sistema IOT.....	37
4.1.	Especificaciones funcionales.....	37
4.2.	Arquitectura del sistema IOT.....	37
4.2.1.	Raspberry Pi.....	38
4.2.2.	Node Red.....	40
4.2.3.	MQTT.....	40

4.2.4.	InfluxDB.....	41
4.2.5.	Grafana	42
4.3.	Funcionamiento del sistema.....	42
4.4.	Monitorización de datos	43
4.5.	Actuación sobre el sistema de forma remota.....	45
4.6.	Resultados	47
5.	Conclusiones y futuras líneas de trabajo.....	49
6.	Bibliografía	51
Anexo 1.	Esquemas eléctricos sistema de extracción de agua.....	52
Anexo 2.	Esquemas electricos sistema de riego.....	54

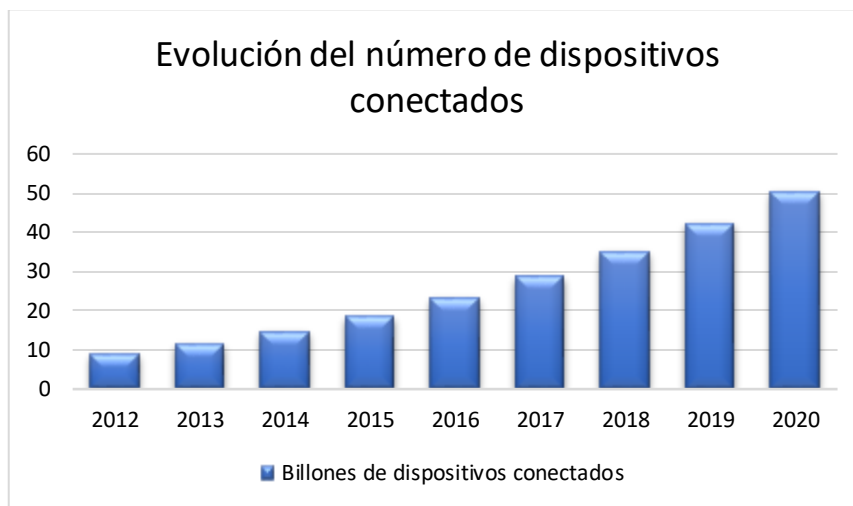
Tabla de Ilustraciones

1 Evolución de los equipos IOT conectados ²	1
2 Evolución de las precipitaciones y temperaturas en España (fuente AEMET) ⁶	3
3 Evolución de la población mundial ⁷	3
4 Esquema del sistema de bombeo (izquierda) y visión satélite de la finca (derecha).....	6
5 Esquema del sistema de gestión de riego completo	7
6 Esquema de los componentes	8
7 Sistema de extracción de agua.....	9
8 Esquema de los componentes	9
9 Sistema de riego.....	10
10 Esquema de las acciones del sistema	11
11 Irradiación solar mensual en la finca agrícola ⁸	13
12 Energía solar diaria por mes en la finca agrícola.....	14
13 Energía solar diaria por mes en Fuentelmonge	15
14 Arduino UNO ¹¹	19
15 Instalación de bomba de pozo y sondas ¹²	20
16 Esquema de maniobra	22
17 Esquema de potencia.....	22
18 Diagrama de estados modo manual	23
19 Sistema parado por nivel de agua bajo.....	24
20 Diagrama de estados modo automático	25
21 Sistema esperando que se alcance el nivel de agua óptimo	25
22 Diagrama de estados modo automático	26
23 Comparativa del volumen de agua extraído con ambos sistemas.....	27
24 Arduino Mega ¹³	30
25 Sensores ¹⁴	30
26 Esquema de maniobra	31
27 Esquema potencia	32
28 Diagrama de estados modo manual	33
29 Diagrama de estados para inicio del modo automático	33
30 Sistema en modo de espera.....	34
31 Diagrama de estados del ciclo de riego modo automático	34
32 Diferencia tamaño de árboles.....	35
33 Bomba de presión Gardena ¹⁵	36
34 Esquema de la arquitectura del sistema	38
35 Partes de una placa Raspberry Pi ¹⁶	39
36 Modelos de Raspberry Pi: 3B+ (izquierda) y Zero W (derecha) ¹⁷	40
37 Esquema de funcionamiento del sistema IOT	43
38 Nodos Node Red para el envío de datos	44
39 Cuadro de mando desarrollado en Node Red.....	45
40 Nodos Node Red para el envío de instrucciones de forma remota	46
41 Esquema de funcionamiento del envío de instrucciones.....	46
42 Cuadro de mando en modo automático remoto	47
43 Gateway Gardena ¹⁸	48

1. Introducción

1.1. IOT aplicado a la agricultura

Una de las tecnologías que ha sufrido una mayor expansión en los últimos años ha sido el Internet de las cosas. Este crecimiento ha sido generado por la reducción de coste de los microprocesadores y microcontroladores, así como su mayor capacidad de procesamiento de datos. Se espera que para 2020 haya 50 billones de dispositivos conectados¹.



1 Evolución de los equipos IOT conectados ²

Cisco estima que el IOT nació en algún momento entre 2008 y 2009 y sigue en pleno desarrollo en nuestros días¹. El número de aparatos conectados aumenta no solo porque cada vez el número de personas con acceso a internet es mayor, sino porque las aplicaciones del IOT se amplían y tienen aplicaciones en más aspectos de nuestras vidas: árboles, zapatos, vacas o incluso las tuberías están conectados. Sin embargo, todavía existen algunos aspectos que dificultan la expansión de esta tecnología. Entre ellos destacan:

- La implementación de IPv6 (Internet Protocol Version 6).
- Mejora de la seguridad de las comunicaciones.
- Implantación en todas las áreas de la red 3G y 4G.
- La energía para alimentar los equipos.
- Crear estándares en torno a la seguridad, privacidad, arquitectura y comunicaciones.

¹ Fuente de la información: https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf

² Fuente de la información: https://www.researchgate.net/figure/Cisco-forecasting-regarding-the-IoT-evolution-till-2020_fig2_322087251

En el sector de la agricultura esta tecnología no ha sufrido el mismo desarrollo que en otros sectores debido a diferentes factores ³:

- Espacios aislados con dificultad para acceder a la red eléctrica.
- Áreas de trabajo muy extensas.
- Redes de datos deficientes.

En la actualidad, según se va implantando las redes de datos (3G y 4G) en los entornos rurales se permite que esta tecnología pueda ser aplicada a este sector. Empresas como Bosch o Libellium están trabajando en soluciones IOT específicas para agricultura que puedan ayudar a los problemas antes comentados.

En el caso de Bosch, lanzo en 2017 Plantect ⁴. Este es un sistema que recopila datos de las plantas a través de una serie de sensores enviando estos a una serie de bases de datos para su posterior análisis a través de sus algoritmos propios. Con ello, es capaz de detectar enfermedades en las plantas antes de que sean visibles. Gracias a esto, los agricultores son capaces de tratar las plantas en una etapa de la enfermedad más temprana, consiguiendo mejores resultados en los tratamientos.

Libellium ha lanzado al mercado un kit que está formado por una serie de dispositivos junto con placas solares para su alimentación eléctrica ⁵. Con ello son capaces de controlar una serie de parámetros críticos para las plantas y enviarlos para su almacenamiento en una base de datos junto a su posición GPS. De este modo, los agricultores son capaces de ver estos parámetros en tiempo real, así como el histórico en cada punto.

Poco a poco el IOT se va introduciendo en el sector agrícola y en los próximos años podremos ver como la digitalización del campo se implanta definitivamente.

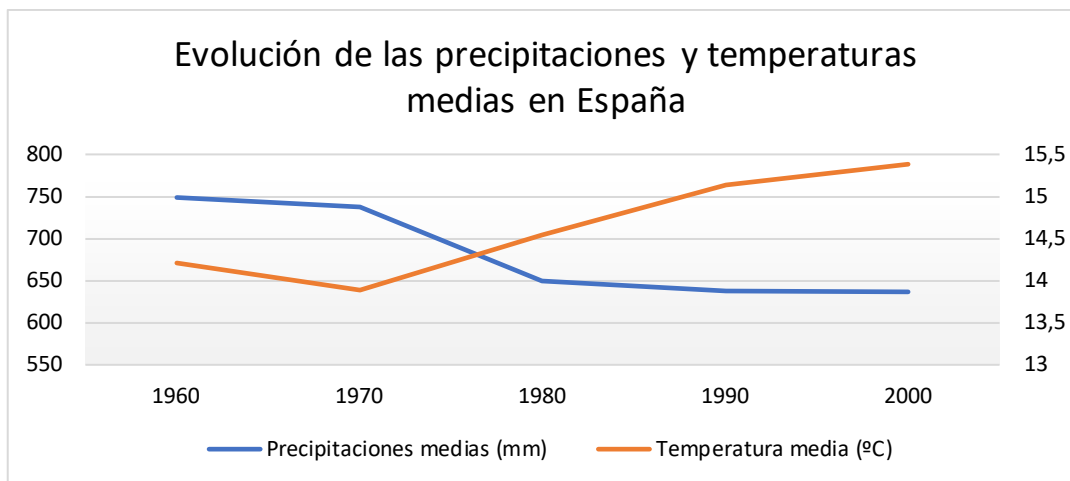
1.2. Motivación del proyecto

La gestión del caudal de agua de riego es una parte fundamental para cualquier explotación agrícola. El correcto desarrollo de los árboles, así como la cosecha dependen en gran medida de ello. Durante las últimas décadas el volumen de agua de lluvia ha disminuido de forma importante, así como el agua contenida en los embalses, limitando los caudales de agua disponible para riego. Por otro lado, la temperatura media se ha incrementado de forma estable, provocando una mayor necesidad hídrica para el desarrollo de las plantas.

³ Fuente de la información: <https://www.redeweb.com/articulos/instrumentacion/internet-de-las-cosas-en-la-agricultura/>

⁴ Fuente de la información: <https://blog.bosch-si.com/agriculture/how-farmers-use-iot-to-stop-disease/>

⁵ Fuente de la información: <https://www.the-iot-marketplace.com/libellium-smart-agriculture-vertical-kit>



2 Evolución de las precipitaciones y temperaturas en España (fuente AEMET) ⁶

Por otro lado, uno de los principales desafíos de las próximas décadas es conseguir producir alimentos suficientes para satisfacer a la población mundial. En 2050 tendremos que producir un 70% más de alimentos que hoy en día.



3 Evolución de la población mundial ⁷

Como se planteaba en el punto anterior, el IOT podría ser una de las iniciativas que nos ayuden a alcanzar este objetivo mejorando el uso de recursos como el agua de riego, fertilizantes o pesticidas. El uso de esta tecnología para la gestión del agua de riego nos permite regar en momentos y en cantidades óptimas, de modo que mejoramos el aprovechamiento de esta. Este riego se puede realizar de forma autónoma, basado en indicadores clave, de modo que evitamos la intervención humana y podemos aprovechar los momentos óptimos para las plantas, que de otro modo sería muy complicado ya que requeriría un análisis continuo in situ y la intervención humana.

⁶ Fuente de la información: http://www.aemet.es/es/idi/clima/registros_climaticos

⁷ Fuente de información: https://es.wikipedia.org/wiki/Poblaci%C3%B3n_mundial

Por otro lado, el uso del IOT para aportar información de forma remota a los agricultores puede ser de gran ayuda para anticipar problemas. También pueden avisar a los agricultores del nivel de humedad del suelo o del propio fruto, de modo que puedan decidir el momento óptimo de recolección o avisar de una helada que podría acabar con la producción de ese año.

1.3. Objetivos y alcance

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema automático de gestión del riego basado en tecnologías de código abierto. Este sistema será utilizado en una finca agrícola de regadío que cuenta con un pozo profundo para la extracción de agua. El agua de riego proviene de la suma del agua extraída del pozo y proveniente de fuera de la instalación. Dicha finca se encuentra aislada de la red eléctrica, con difícil acceso, y por tanto toda la energía utilizada debe ser generada en la propia instalación.

Mediante el desarrollo de este proyecto buscamos aumentar el uso del volumen de agua de riego proveniente del pozo y mejorar el riego en toda la finca. Toda la energía utilizada debe ser generada mediante fuentes renovables y se hará uso de tecnología de código abierto (Open Source) para alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- 1) Desarrollar un sistema que gestione la extracción de agua del pozo profundo de forma totalmente automática. Buscamos maximizar la capacidad del caudal del pozo, extrayendo el agua siempre que se encuentre entre unos niveles prefijados, y se den las condiciones ambientales y de funcionamiento de la bomba adecuadas.
- 2) Desarrollar un sistema de riego mediante una bomba de presión que uniformice la presión del agua en todo el sistema de riego por goteo. El sistema deberá ser capaz de regar tanto en modo automático como manual según las necesidades del usuario. En modo automático regará de forma autónoma, sin necesidad de intervención humana. Deberá tener en cuenta las condiciones atmosféricas para el riego.
- 3) Crear un sistema de monitorización de los parámetros clave del sistema de riego que nos informe de su funcionamiento en tiempo real, así como genere un histórico de datos. Deberá alertar en caso de anomalía y debemos poder actuar sobre los dos sistemas de los objetivos anteriores de forma remota.

1.4. Descripción general

En el segundo capítulo se realiza una descripción del proyecto, explicando cuales van a ser los componentes del sistema completo, así como la relevancia de cada uno de ellos.

En el tercer capítulo se analizan los diferentes subsistemas de este proyecto, comentando su desarrollo, así como su funcionamiento. Se detallan los esquemas eléctricos y electrónicos de ambos sistemas, así como los componentes utilizados.

En el cuarto capítulo, se aborda el desarrollo del sistema IOT de monitorización, detallando sus funcionalidades para el reporte remoto de datos y su capacidad de actuación remota. También se detallan los elementos que componen este sistema.

En el último capítulo, se exponen las conclusiones junto con las futuras líneas de trabajo.

Finalmente, en la memoria se recogen los siguientes apéndices:

- Anexo 1: diagramas eléctricos del sistema de extracción de agua
- Anexo 2: diagramas eléctricos del sistema de riego

2. Descripción del proyecto

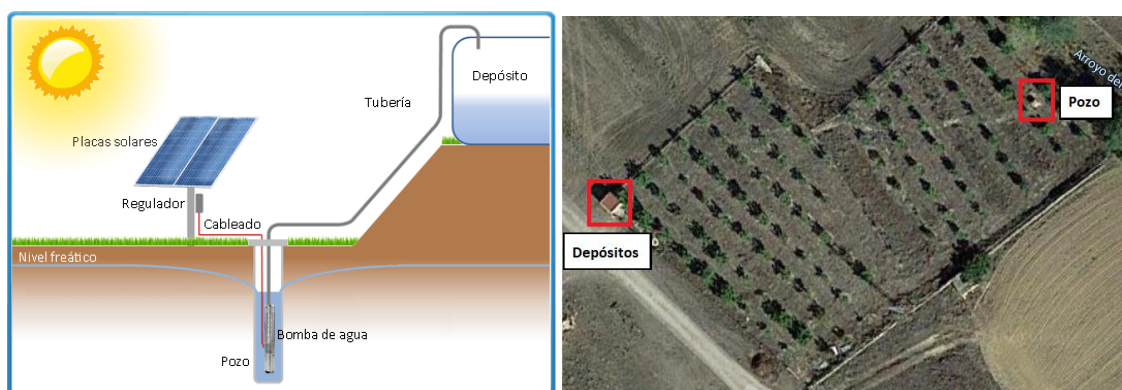
En este capítulo se realiza una descripción general del proyecto, comenzando por los requisitos generales del sistema y describiendo a continuación cada una de las partes por separado.

2.1. Funcionamiento del sistema

Este proyecto se desarrolla en una finca de regadío que cuenta con un pozo de extracción de agua, así como un conjunto de 3 depósitos conectados entre sí para su almacenamiento y posterior riego. En la ilustración 4 izquierda podemos ver un esquema de este sistema de riego.

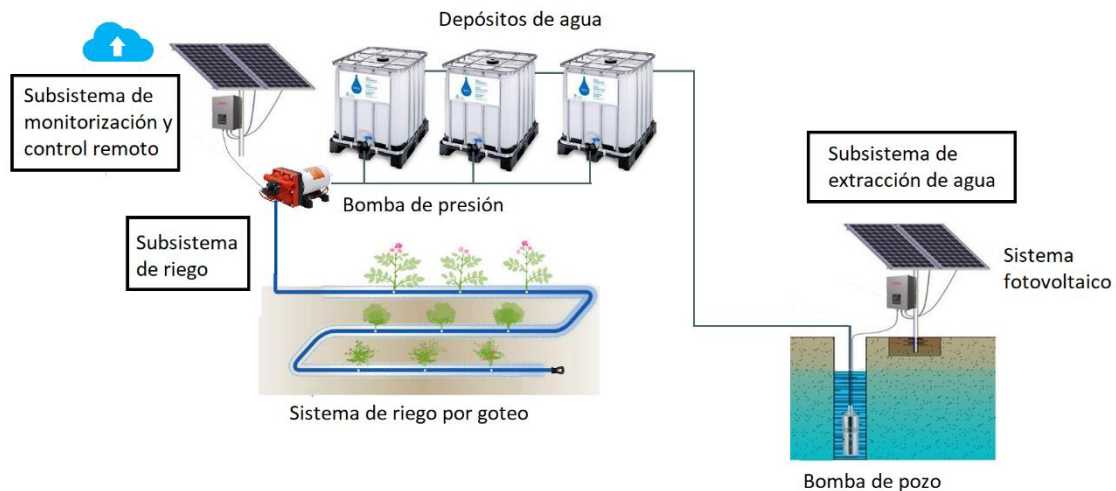
El agua del pozo se extrae mediante una bomba que la sube hasta los depósitos donde es almacenada. El sistema existente es accionado de forma manual, de modo que no conseguimos un aprovechamiento óptimo del pozo.

Una vez el agua ha sido almacenada, se utiliza para el riego haciendo uso de un controlador de riego por presión hidrostática. Los árboles se disponen en bancales en cuesta, como puede verse en la ilustración 4 derecha, por lo que la presión hidrostática no es uniforme en toda la finca. Es necesario aumentar la presión del sistema de forma que esta sea estable a lo largo de todo el terreno.



4 Esquema del sistema de bombeo (izquierda) y visión satélite de la finca (derecha)

Para la ejecución de este proyecto, se han desarrollado un conjunto de subsistemas los cuales se exponen en los siguientes apartados. El subsistema de extracción de agua se encargará de la extracción de agua del pozo de una forma automática hasta los depósitos, donde será almacenada. Esta agua será utilizada por el subsistema de riego para regar los árboles a través del sistema de riego por goteo y el subsistema de monitorización de datos se encargará de enviar de forma remota datos del funcionamiento del sistema de riego. En la siguiente ilustración se puede ver un esquema del sistema completo.



5 Esquema del sistema de gestión de riego completo

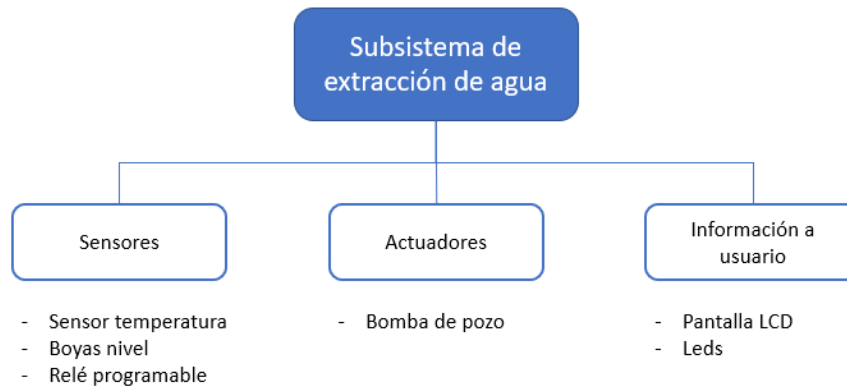
Se deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Subsistema de extracción de agua: extraer el agua del pozo de una forma automática sin la necesidad de intervención humana y así mejorar el volumen de agua extraída del pozo. Deberá respetar las condiciones de funcionamiento de la bomba, ambientales y de nivel de agua del pozo. Permitirá al usuario elegir el modo de funcionamiento.
- Subsistema de riego: uniformizar la presión del agua en todo el sistema de riego por goteo permitiendo una gestión automática del riego. Deberá respetar las condiciones de funcionamiento de la bomba y ambientales. Permitirá al usuario elegir el modo de funcionamiento.
- Subsistema de monitorización y control remoto: enviar información del funcionamiento del sistema de riego y permitir su control de forma remota.
- Subsistema de suministro eléctrico: deberá ser capaz proporcionar la energía eléctrica al sistema asignado mediante una fuente de origen renovable.

2.2. Subsistema de extracción de agua

Mediante el desarrollo e instalación de este sistema buscamos automatizar el proceso de extracción de agua del pozo, sin ninguna necesidad de intervención humana. Dicho sistema se alimentará con una instalación solar, formada por dos placas, un controlador y una batería. La bomba se alimentará directamente de las placas solares y la batería será usada para alimentar a nuestro sistema de control.

Esta bomba será activada siempre que el agua dentro del pozo alcance una determinada posición y se cumplan unas restricciones de temperatura. Por otro lado, se deben respetar el tiempo máximo de funcionamiento de la bomba definido por el fabricante. En la siguiente ilustración aparece un esquema de los componentes de este sistema.



6 Esquema de los componentes

Para automatizar el funcionamiento del sistema de extracción de agua contaremos con los siguientes sensores: una sonda de temperatura, tres boyas de nivel y un relé programable. El sensor de temperatura nos permitirá conocer en todo momento la temperatura exterior y activar la bomba solo en caso de que se encuentre dentro del rango de funcionamiento. Contamos con tres boyas de nivel para conocer el nivel del agua del pozo y activar la bomba solo cuando se alcance el nivel óptimo de agua.

Dado que el sistema funcionará haciendo uso de energía solar, es importante que solo se active en aquellas horas solares pico. Para ello, hemos utilizado un relé programable el cual se activa entre las 11:00 y las 17:00. Se ha decidido utilizar un relé horario para tener independencia de la referencia horaria de nuestro sistema principal, ya que cuenta con una pila independiente. Esta franja horaria será válida para todos los meses del año. En el caso de que la intensidad solar sea baja durante esta franja horaria (nubes o tormenta) disminuirá la potencia eléctrica suministrada a la bomba y por tanto la capacidad de bombeo.

Se podrá decidir entre un funcionamiento automático, en el que el sistema de extracción de agua comprobará las medidas de los sensores y activará la bomba cuando se cumplan las condiciones de funcionamiento, o un modo manual, en el cual el agricultor activará la bomba y comenzaremos a sacar agua del pozo. Estos modos serán elegidos por el usuario haciendo uso de los selectores disponibles para ello.

Por otro lado, contamos con una pantalla que muestra la información relacionada con el funcionamiento del sistema. Además de mostrar el modo de funcionamiento, nos dará información del tiempo de funcionamiento o de espera o de la temperatura actual.

Para extraer el agua del pozo se utiliza una bomba sumergible. Este tipo de bombas, como indica su propio nombre, se encuentran totalmente sumergidas en el fluido y cuentan con un motor acoplado dentro del cuerpo de la bomba cerrado herméticamente. Para nuestra aplicación se ha seleccionado una bomba de 12V y 96W que funciona directamente con la energía producida por las placas solares.

Finalmente, contamos con una serie de indicadores luminosos para avisar del modo de funcionamiento:

- Blanco: modo manual.
- Naranja: modo automático.

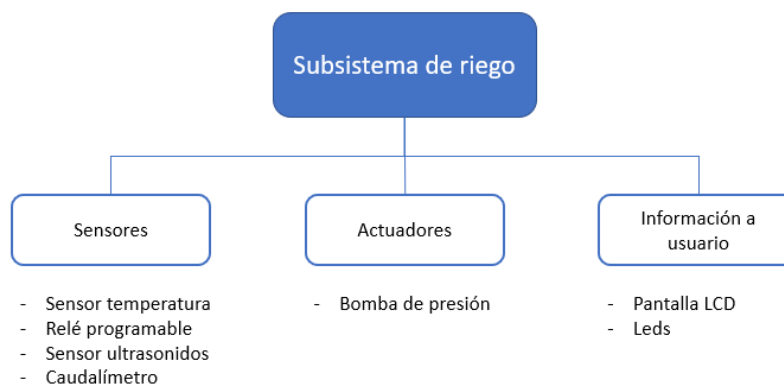
- Azul: nivel de agua del pozo completo.
- Verde: bomba activa.
- Rojo: estado de alerta o sistema parado por algún motivo.



7 Sistema de extracción de agua

2.3. Subsistema de riego

Como se comentaba al inicio de este capítulo, necesitamos estabilizar la presión del agua en toda la instalación de riego para uniformizar los caudales de riego en cada árbol. Para ello se ha desarrollado un sistema, al igual que en el caso anterior, alimentado por energía solar, que controla una bomba de riego a partir del agua almacenada en los depósitos. Este sistema cuenta con un sensor de temperatura, dos selectores manuales, una pantalla, cuatro leds indicadores, un sensor de ultrasonidos y un caudalímetro.



8 Esquema de los componentes

De forma similar al caso de extracción de agua del pozo, a través de los selectores podremos elegir un modo manual y otro modo automático.



9 Sistema de riego

En el modo manual activaremos la bomba siempre y cuando la temperatura se encuentre en el rango de funcionamiento. Si permanece activo durante más de hora y media, el sistema parará la bomba y mostrará por pantalla un mensaje de aviso ya que podríamos poner en riesgo la bomba por calentamiento.

En el modo automático, utilizaremos un relé horario para indicar la ventana de horas solares pico en las cuales funcionará nuestro sistema. Dentro de dicha ventana, regaremos durante media hora activando la bomba. Este relé, además de delimitar las franjas horarias de funcionamiento, en su programación permite discernir entre los diferentes días de la semana, permitiendo al agricultor delimitar que días de la semana prefiere regar disminuyendo estos en determinadas épocas, como en invierno, cuando los árboles tienen menores necesidades hídricas.

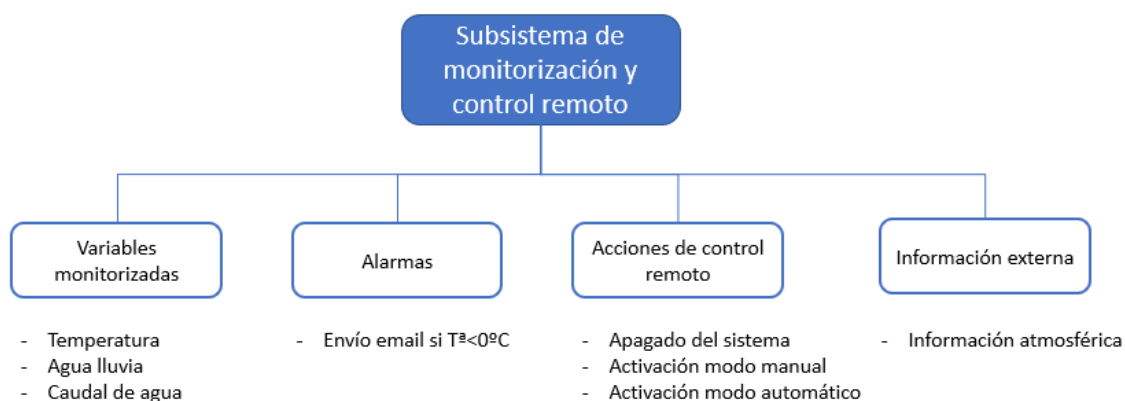
El caudalímetro es utilizado para medir el caudal del agua de riego a la entrada de la bomba, el cual se mostrará por pantalla. Además, buscamos medir caudal de agua de lluvia, para ello la recogeremos y guiaremos hasta un depósito donde situaremos el sensor de ultrasonidos para medir el volumen de agua caída.

Finalmente, la bomba elegida para esta aplicación ha sido una bomba de presión. Este tipo de bombas se utilizan para aumentar la presión sobre el circuito de agua, gracias a su motor que acciona un sistema de rodets con álabes que al girar generan un campo de presiones sobre el fluido. En nuestro caso se ha elegido una bomba de 12V, 96W y 2.4 bar de presión que funciona directamente con energía solar.

2.4. Subsistema de monitorización y control remoto

Gracias a los dos sistemas anteriores conseguimos que tanto la extracción de agua como el riego puedan funcionar de una forma autónoma sin tener que intervenir sobre ellos. Sin embargo, no podemos conocer el estado del sistema sin estar presencialmente. Para ello se ha desarrollado un sistema que nos permite recoger una serie de variables del sistema de riego y monitorizarlas de forma remota, así como poder tomar decisiones sobre su funcionamiento.

En la siguiente ilustración aparece el conjunto de acciones que puede llevar a cabo este sistema y en los siguientes párrafos se comentan cada una de ellas.



10 Esquema de las acciones del sistema

Una de las principales variables a tener en cuenta es la temperatura, ya que marcará de forma directa el funcionamiento del sistema de riego y puede poner en riesgo el sistema de tuberías si no actuamos de forma correcta. Por ello será una de las variables que monitorizaremos y analizaremos para poder actuar de forma remota en caso de que consideremos que existe riesgo. Además, en el caso de que la temperatura baje por debajo de 0°C el sistema enviará un email a la dirección del usuario alertando de esta situación. El propio sistema no regará si baja de esta temperatura por debajo de este umbral, pero de este modo tenemos una doble seguridad, pudiendo parar el sistema de forma remota si así lo consideramos.

Por otro lado, es importante conocer el caudal de agua de riego, ya que nos muestra cual es el volumen de agua que estamos aportando a los árboles. Además, nos permitiría conocer anomalías en el funcionamiento de la bomba en el caso de que existieran y poder repararla o sustituirla de forma precoz, con una menor afección sobre el riego. Para ello reportaremos de forma remota el dato del caudalímetro, el cual mide los litros de agua de riego.

El volumen de agua de riego es la suma del agua aportada a través de nuestro sistema y del agua de lluvia caída. Por tanto, es muy importante poder conocer que volumen de agua ha caído y en cuyo caso poder actuar sobre nuestro sistema de riego, tanto aumentando como disminuyendo el volumen aportado. Para ello reportaremos el dato del sensor de ultrasonidos, el cual nos aporta el dato de columna de agua sobre un volumen controlado, dándonos a conocer por tanto el agua de lluvia caída.

Finalmente contaremos con información procedente de la AEMET que nos aportará datos que no podemos medir con nuestro sistema, así como una previsión semanal de las condiciones atmosféricas.

Además del sistema de monitorización de datos comentado en los párrafos anteriores este sistema nos permitirá un control remoto del sistema de riego, pudiendo elegir el modo de funcionamiento de forma remota o el apagado total del sistema. Al ser una finca aislada esto nos permitirá modificar de forma remota el estado del sistema que se estableció de forma manual anteriormente.

Ambas herramientas, de monitorización de datos y de control remoto, hacen que podamos conocer la situación del sistema y además podamos actuar ante cualquier anomalía detectada o situación excepcional.

2.5. Subsistema de suministro eléctrico

Como se ha comentado anteriormente ambos sistemas de bombeo serán alimentados por energía solar. En el caso del sistema de extracción de agua, contamos con una instalación fotovoltaica ya instalada. Debemos comprobar que es adecuada para alimentar nuestro sistema. En el caso del sistema de riego junto al de monitorización y control remoto debemos realizar una nueva instalación solar.

2.5.1. Instalación fotovoltaica para la extracción de agua

En primer lugar, analizamos los elementos que tendrán consumo para ver el total de energía eléctrica diaria necesaria.

Tabla 1 Consumo de potencia eléctrica de los elementos del sistema

Carga					
Cantidad	Equipo	Potencia (Watts)	Potencia total (Watts)	Nº Horas funcionamiento al día	Energía Requerida Wh/día
1	Bomba de agua	96	96	2,5	240
1	Arduino UNO	0,096	0,096	24	2,304
2	Luces del sistema	0,01	0,02	24	0,48
Ed:					241,58 Wh/día

Se ha definido que la bomba trabajará durante 2.5h al día y el Arduino junto con los leds indicadores trabajarán las 24h del día.

Para el cálculo de los paneles solares utilizaremos dos modos diferentes para asegurarnos que la instalación está dimensionada correctamente. Esto se realiza así ya que en cada método se asumen una serie de simplificaciones que pueden provocar que el cálculo no sea 100% exacto.

En primer lugar, vamos a utilizar la fórmula:

$$Ar = 1200 \times Ed / Id$$

Donde:

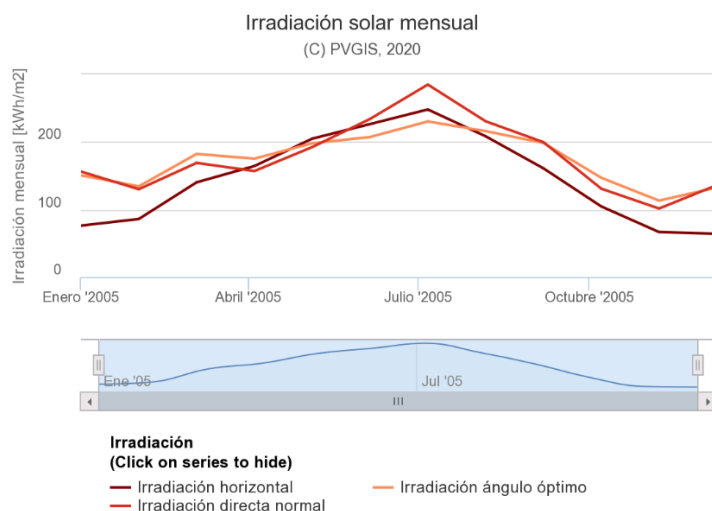
Ar: Tamaño del panel (Wp)

Ed: Consumo de electricidad (kWh / día)

Id: Irradiación (kWh / m² / día)

El tamaño de un sistema fotovoltaico está dado por el Watt Pico (Wp). Esta es la salida máxima de un panel solar fotovoltaico bajo condiciones estándar que son: temperatura ambiente de 25°C y 1000 Watt/m² de irradiación. Se estima una eficiencia de un 10% de los paneles solares. Si fuese así la constante de la ecuación sería 1000. Sin embargo, se utiliza el parámetro de 1200 ya que asumimos que el conjunto de la instalación tendrá una eficiencia menor.

Determinamos la Irradiación solar en nuestra ubicación haciendo uso de la base de datos PVGIS:



11 Irradiación solar mensual en la finca agrícola⁸

Determinamos que la irradiancia es 4,28 Kwh/m²/día en Fuentelmonge (Soria).

Así la fórmula quedaría:

$$Ar = 1200 \times 0.241 / 4.28 = 67.76W$$

Por tanto, los dos paneles solares de 50W existentes son suficientes.

Además, vamos a calcular la instalación haciendo uso del método de las horas solares pico (HSP). La hora solar pico (HSP) es una unidad que mide la irradiación solar y se define como la energía por unidad de superficie que se recibiría con una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m². La necesidad total de energía diaria calculada anteriormente es de 241W/día.

Los datos de la instalación son:

Tabla 2 Datos de la instalación solar

Inclinación	40°
Valor de corrección atmosférico	1,05
Potencia paneles	100 W
Rendimiento proceso	100%

Para calcular la energía solar diaria en la ubicación de la finca vamos a utilizar la fórmula:

$$Energía\ diaria = Factor\ K \times Factor\ H \times Potencia\ instalada \times Rendimiento$$

Donde:

Factor K⁹: es un parámetro obtenido en base a latitud, inclinación y mes del año.

Factor H⁹: es un parámetro obtenido en base a la ubicación geográfica y el mes [MJ/m²].

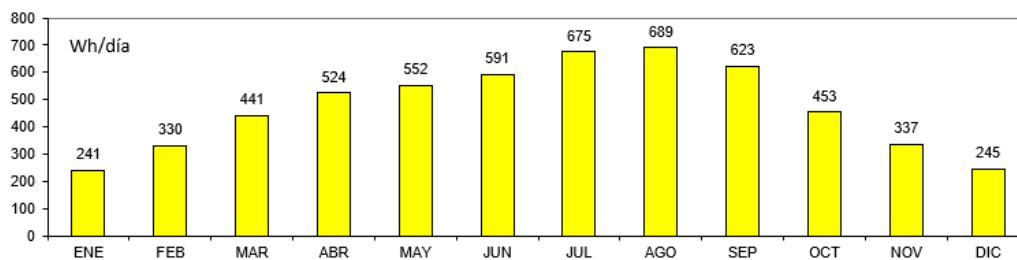
Potencia instalada: potencia total de los paneles instalados.

Rendimiento: rendimiento estimado de los paneles.

⁸ Fuente de la imagen: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

⁹ Fuente de la información: <https://nergiza.com/como-calculer-una-instalacion-fotovoltaica/>

En base a esta fórmula calculamos la energía solar diaria para todos los meses del año en la ubicación de la finca y podemos confirmar que cubrimos la necesidad de nuestro sistema.



12 Energía solar diaria por mes en la finca agrícola

En cuanto a las baterías, buscamos minimizar el uso de estas, dado que tienen una vida útil limitada, y así evitar este problema en el medio plazo. Para ello, la bomba se alimentará a través de los paneles en las horas solares pico y las baterías solo se utilizarán para alimentar el sistema de control.

El consumo a tener en cuenta para dimensionar el tamaño de la batería en el sistema de extracción de agua es de: 1,584 Wh/día.

Utilizamos la siguiente fórmula para determinar el tamaño de la batería.

$$\text{Tamaño batería} = \text{autonomía} \times \text{Ed} / \text{Rend.} \times \text{Descarga} = 1 \times 0.00148 / 0.8 \times 0.5 = 0.00792 \text{ kWh}$$

$$\text{Tamaño batería} = \frac{7.92 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 0.66 \text{ Ah}$$

Los requerimientos de batería para nuestro sistema son muy bajos, por lo que podemos utilizar una pequeña batería para alimentarlo. En nuestro caso utilizaremos una de 12Ah, ya que es una de las de menor tamaño en el mercado.

2.5.2. Instalación fotovoltaica para el sistema de riego

En primer lugar, al igual que en el caso anterior, calculamos el consumo eléctrico de los elementos de nuestro sistema.

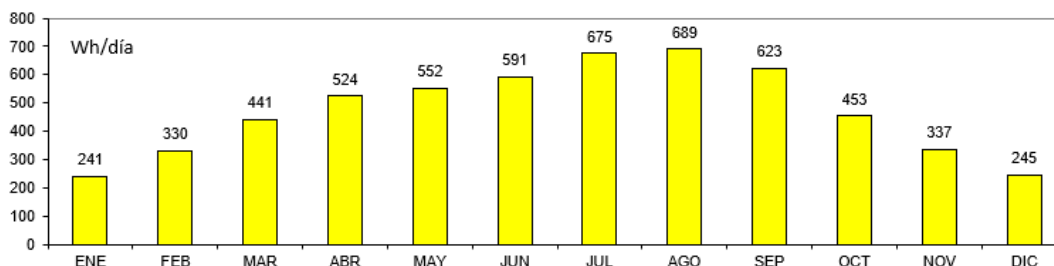
Tabla 3 Potencias de consumo i instalación riego

Carga					
Cantidad	Equipo	Potencia (Watts)	Potencia total (Watts)	Nº Horas funcionamiento al día	Energía Requerida Wh/día
1	Bomba de agua	96	96	2,5	240
1	Arduino Mega	0,096	0,096	24	2,304
1	Raspberry pi Zero	0,12	0,12	24	2,88
2	Luces del sistema	0,01	0,02	24	0,48
					Ed: 245,66 Wh/día

Para el primer cálculo utilizamos la misma fórmula que en el caso anterior con los parámetros de esta nueva instalación:

$$Ar = 1200 \times 0.245 / 4.28 = 68.9W$$

Para esta nueva instalación debemos utilizar dos paneles de 50W. Si dimensionamos el sistema con el método HSP podemos utilizar la misma gráfica:



13 Energía solar diaria por mes en Fuentelmonge

Podemos ver que quizás durante el mes de enero podríamos tener algún problema. Pero durante el invierno las necesidades hídricas de los árboles son menores por lo que podríamos reducir el tiempo de riego de la bomba:

Tabla 4 Potencias de consumo i instalación riego en invierno

Carga					
Cantidad	Equipo	Potencia (Watts)	Potencia total (Watts)	Nº Horas funcionamiento al día	Energía Requerida Wh/día
1	Bomba de agua	96	96	2	192
1	Arduino Mega	0,096	0,096	24	2,304
1	Raspberry pi Zero	0,12	0,12	24	2,88
2	Luces del sistema	0,01	0,02	24	0,48
Ed:					197,664 Wh/día

Para determinar el controlador debemos tener en cuenta la intensidad total del sistema. En este caso prácticamente toda la intensidad será demandada por la bomba, 8 amperios. Se ha elegido un controlador solar de la marca Social que tiene un límite de 20A tanto en carga como descarga.

En cuanto a las baterías, al igual que en el caso anterior buscamos minimizar su uso. La bomba también será alimentada directamente a través de las placas solares. Los consumos a tener en cuenta para el dimensionamiento de las baterías son: 5,664 Wh/día. Para el cálculo de las baterías utilizamos la fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Tamaño batería} &= \text{autonomía} \times \text{Ed} / \text{Rend.} \times \text{Descarga} = 1 \times 0.0056 / 0.8 \times 0.5 \\ &= 0.01416kWh \end{aligned}$$

Siendo:

- Autonomía: los días que el sistema trabajará solo con las baterías debido a la ausencia solar del lugar.
- Ed: Consumo de electricidad (kWh / día)
- Rend.: rendimiento de la batería
- Descarga: descarga total de la batería que permitimos

El tamaño de las baterías se expresa en Amperios hora:

$$\text{Tamaño batería} = \frac{14.16\text{Wh}}{12\text{V}} = 1.18\text{Ah}$$

Con una batería pequeña sería más que suficiente para alimentar cada sistema de control durante un día. Se utilizará una batería de 12Ah al igual que en el caso anterior.

Por otro lado, una parte importante de la instalación es la sección de los cables ya que al trabajar con 12V la intensidad que circula pueden llegar a ser elevada, y si no elegimos la sección de cable adecuada podemos tener caídas de tensión demasiado altas o incluso problemas por calentamiento de los conductores.

La fórmula general para el cálculo de la sección de los conductores es:

$$S = 2 * L * I * \gamma / (VA - VB) = 2 * L * I / 56 * (VA - VB)$$

Siendo:

- L: longitud del cable (m)
- I: intensidad (A)
- γ : conductividad o resistencia específica
- (VA-VB): caída de tensión máxima admisible

Tabla 5 Tabla conductividad de cables eléctricos ¹⁰

Material	γ_{20}	γ_{70}	γ_{90}
Cobre	56	48	44
Aluminio	35	30	28
Temperatura	20°C	70°C	90°C

La caída de tensión máxima admisible, según el IDAE, viene indicada en la siguiente tabla:

Tabla 6 Caída máxima de tensión admisible ¹⁰

Subsistema	Caída tensión máxima	Recomendada
Paneles - Regulador	3%	1%
Regulador - Baterías	1%	0,50%
Baterías - Inversor	1%	1%

¹⁰ Fuente de la información: <https://nergiza.com/que-seccion-de-cable-necesito/>

La longitud del cable desde la placa hasta el regulador es de aproximadamente 5m. La conductividad la elegimos a 20°C, la intensidad eléctrica será de 8A y la caída de tensión la estimamos en un 2%.

$$S = 2 * L * I * \gamma / (VA - VB) = 2 * L * I / 56 * (VA - VB) = 2 * 5 * 8 / 56 * (0.02 * 12) = 5.05 \text{ mm}^2$$

Elegiremos una sección normalizada de 6 mm².

3. Automatización de sistema

En el apartado anterior comentábamos el funcionamiento general del sistema. A continuación, se van a definir los diferentes componentes y la arquitectura de este sistema.

3.1. Sistema de extracción de agua

Sistema de extracción de agua está formado por los siguientes elementos:

- Sistema de control.
- 2 placas solares de 50W y 12V.
- Controlador solar.
- Batería.
- Relé programable.
- Sonda de temperatura.
- Sondass de nivel.
- Bomba de pozo.

3.1.1. Especificación funcional

El sistema desarrollado deberá poder extraer el agua del pozo siempre que se den las condiciones adecuadas desde el punto de vista de temperatura, nivel de agua del pozo y hora del día. Este sistema será alimentado con energía solar y para ello deberá poder monitorizar las horas solares pico y activar la bomba solo dentro de esta ventana horaria.

Deberá monitorizar el nivel de agua del pozo y extraerla solo cuando el pozo se encuentre lleno. Además, deberá evitar que el nivel de agua del pozo descienda por debajo de un nivel mínimo para evitar que la bomba trabaje en vacío. Por otro lado, tendrá que respetar el tiempo de funcionamiento máximo de la bomba para evitar su sobrecalentamiento.

El sistema nunca funcionará en caso de que la temperatura descienda por debajo de los 0°C, para evitar que las tuberías puedan estar heladas. Si la temperatura desciende por debajo de este umbral, el sistema deberá asegurar que no existen tuberías heladas cuando la bomba vuelva a funcionar.

Como interfaz como el usuario, contará con una serie de leds y una pantalla que informará al usuario del estado del sistema en todo momento. Los leds indicarán de forma visual los diferentes estados del sistema, alertando en caso de anomalía. La pantalla deberá mostrar toda la información disponible del sistema, así como el tiempo de funcionamiento o espera restante. Se deberá elegir una bomba de pozo que pueda trabajar directamente con los paneles fotovoltaicos, sin necesidad de uso de baterías, y a su vez pueda subir el agua desde el pozo hasta los depósitos (60 metros de altura de columna de agua).

El sistema contará con diferentes modos de funcionamiento que serán elegidos por el usuario mediante unos selectores. A continuación, se definen cuáles son las funciones de cada uno de estos modos.

A) Modo de funcionamiento apagado

En este estado de funcionamiento el sistema permanecerá en reposo a la espera de que sea activado algún otro modo de funcionamiento. Se monitorizará la temperatura y se mostrará por pantalla, de igual modo que se mostrará el modo de funcionamiento actual.

B) Modo de funcionamiento manual

Este modo de trabajo será activado por el usuario al girar el selector correspondiente. Este modo de funcionamiento busca activar la bomba de forma manual por si fuese necesario extraer agua en algún momento puntual, sin necesidad de esperar a que se active la bomba en el modo automático.

Una vez activado, la bomba comenzará a funcionar siempre y cuando el nivel del pozo se encuentre por encima de un nivel mínimo, por encima del nivel de la bomba, y se cumplan el resto de condiciones establecidas. Este sistema tendrá prioridad por encima del modo automático, de tal forma que si ambos se activan a la vez este será prioritario.

C) Modo de funcionamiento automático

Este modo de funcionamiento será el encargado de gestionar de forma automática la extracción de agua sin la necesidad de intervención humana. Una vez que se active este modo de funcionamiento, por medio del selector correspondiente, el sistema se encargará de extraer el agua del pozo de forma automática siempre que se den las condiciones adecuadas.

El ciclo de extracción de agua se sucederá de forma cíclica extrayendo el agua del pozo en función del tiempo de llenado del mismo, así como el resto de condiciones antes comentadas. Para comenzar la extracción de agua del pozo este deberá alcanzar su máximo nivel de llenado y una vez comience el ciclo de extracción el nivel de agua dentro del pozo no debe sobrepasar el nivel mínimo por encima de la bomba.

3.1.2. Componentes

El sistema está basado en un controlador principal que recibe una serie de señales de diferentes sensores y controla los actuadores haciendo uso de una serie de relés.

El controlador utilizado es un Arduino. Arduino es una plataforma de código abierto que cuenta con un microcontrolador y un conjunto de pines donde poder realizar conexiones entre el microcontrolador y todo tipo de sensores y actuadores. Fue creado en 2005 en Italia con el objetivo de fomentar el estudio de la electrónica y la informática.

En este sistema el modelo utilizado ha sido un Arduino UNO. Este controlador cuenta con 14 pines digitales y 6 salidas analógicas. Utiliza el microcontrolador ATmega328P de la marca Atmel.



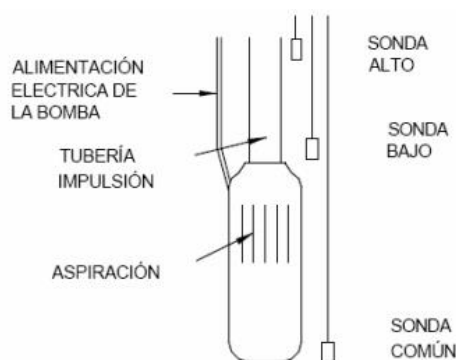
14 Arduino UNO ¹¹

¹¹ Fuente de la imagen: <https://tienda.bricogeeek.com/arduino/305-arduino-uno.html>

Se ha elegido este controlador de código abierto ya que nos permite controlar diferentes tipos de sensores de forma sencilla. Arduino cuenta con una amplia comunidad internacional que desarrolla librerías para facilitar el uso de todo tipo de sensores y actuadores. Por otro lado, presenta un bajo consumo de energía, muy importante al ser alimentado con energía solar.

A continuación, se exponen los sensores utilizados, que serán los encargados de proporcionar la información al controlador para su posterior análisis. Para controlar la temperatura se ha utilizado una sonda DS18B20, la cual cuenta con un encapsulado de acero inoxidable que la hace resistente al agua. Tiene un rango de funcionamiento de -55°C hasta 125°C con una resolución de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y es totalmente compatible con Arduino gracias a las librerías existentes.

Existen diferentes tipos de sondas para controlar el nivel de agua de un pozo o depósito. En nuestro caso, se ha decidido utilizar tres sondas de nivel con terminal eléctrico. Estas sondas son ampliamente utilizadas para pozos profundos ya que el espacio dentro de estos es escaso y situando las mismas en los lugares apropiados podemos conocer el estado dentro del pozo de una forma rápida, económica y fiable. La boya situada más abajo (común), justo por encima de la bomba, está conectada a la tensión de la placa (12VDC). Si el agua cubre cualquiera de las dos boyas superiores, estas recibirán la tensión conducida por el agua y de esta manera podremos conocer el nivel de agua dentro del pozo.



15 Instalación de bomba de pozo y sondas ¹²

El relé horario será el encargado de definir la ventana horaria de funcionamiento, coincidiendo con las horas solares pico. Este relé programable cuenta con una pila independiente la cual tiene una duración de 5 años. De esta forma, en caso de que el sistema principal se apagara (por falta de luz solar, fallo batería, etc) no perderíamos la referencia horaria. Mediante el uso de este relé programable nos aseguramos de que nuestro sistema siempre trabaje dentro de las horas solares pico y, por tanto, de máxima potencia eléctrica fotovoltaica.

Finalmente, contamos con 2 selectores manuales para que el usuario pueda actuar sobre el sistema de forma presencial. Al girarlos Arduino recibe la señal de que un determinado modo de funcionamiento ha sido activado por el usuario. Se han utilizado estos selectores ya que tienen un funcionamiento robusto, estanco y duradero, sobre todo teniendo en cuenta el entorno de trabajo del sistema.

¹² Fuente de la imagen: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1126pub.pdf>

Por otro lado, contamos con una pantalla LCD de 20x4 caracteres (cuatro líneas de 20 caracteres cada una). La conexión directa de esta pantalla con Arduino es compleja por ser necesarias muchas conexiones, lo que implica un uso de un gran número de pines. Para simplificarla, se ha utilizado un controlador I2C, de modo que comunicamos la pantalla con Arduino a través del bus I2C. Esto simplifica de forma importante la conexión, utilizando solo 4 pines.

El actuador de este sistema es la bomba utilizada para extraer el agua. Esta bomba está dimensionada para trabajar con la capacidad de la instalación solar, pero proporcionando un caudal suficiente para extraer el agua que mana del pozo diariamente. La bomba elegida ha sido una bomba de pozo de la marca Eco Worthy. Esta bomba puede ser sumergida hasta 30m de profundidad y tiene una potencia de 96W, que permite elevar la columna de agua hasta una altura de 70m. Está diseñada para ser alimentada directamente desde las placas solares a una tensión de 12V.

Para accionar la bomba se utilizará un relé de alta potencia que pueda soportar la intensidad requerida por la bomba. El conjunto de leds servirá para alertar de los diferentes tipos de funcionamiento o errores del sistema. Al igual que la bomba serán activados por Arduino.

3.1.3. Estructura e interconexiones

Para definir el funcionamiento eléctrico del sistema podemos separarlo en dos partes:

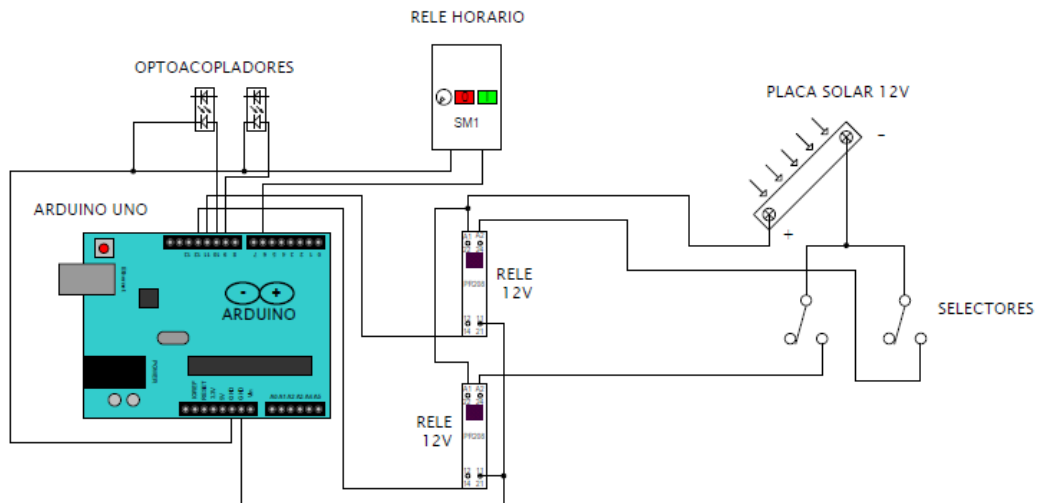
- Esquema de maniobra: engloba aquellos componentes y señales que llegan a nuestro sistema.
- Esquema de potencia: hace referencia a los componentes que controlan los actuadores.

La tensión de funcionamiento de nuestro sistema será la proporcionada por las placas solares, 12VDC. Tanto la bomba como los leds funcionan a esta tensión. Sin embargo, la tensión de funcionamiento de los pines de Arduino es de 5VDC. Como veremos a continuación, para salvar este problema se utilizan relés de diferentes tipos para evitar daños en nuestro controlador.

En cuanto a la parte de maniobra, en primer lugar, tenemos los selectores que utilizamos para elegir el modo de funcionamiento. Cada selector está conectado a la tensión de la placa y a un terminal de control de un relé de 12VDC, tenemos dos relés de este tipo, uno para cada selector. Las conexiones de control de cada relé están conectadas a los 0V de Arduino y a un pin digital de entrada. De este modo, al activar cada selector, activamos el relé de 12V, y hacemos que el pin correspondiente de Arduino reciba 0V. Al estar configurados como entero pull-up podemos recibir correctamente la señal de activación de cada modo de trabajo.

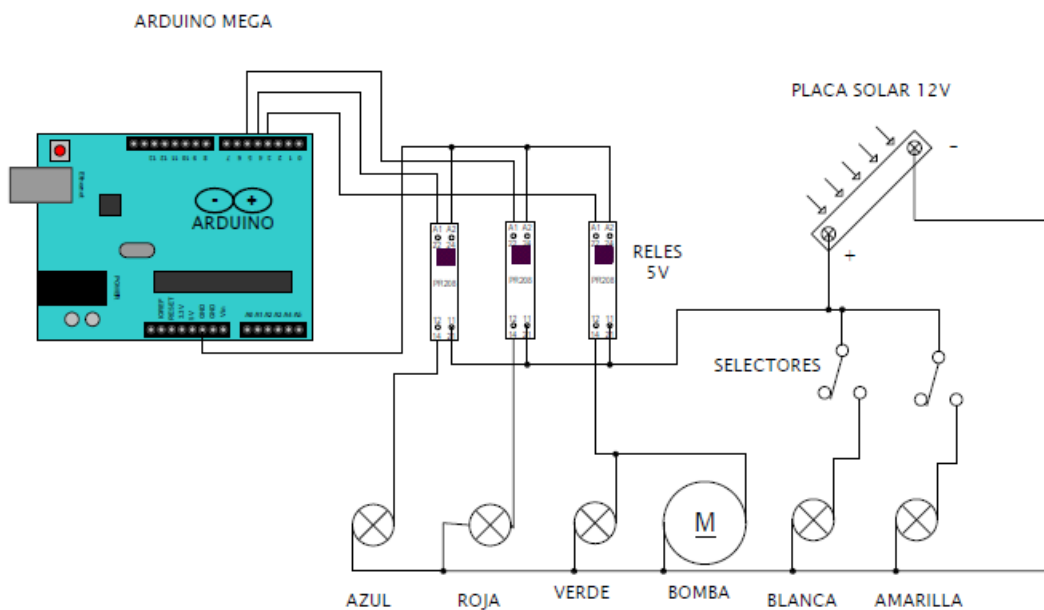
Por otro lado, tenemos dos optoacopladores para recibir la señal de las boyas de nivel. El funcionamiento para que Arduino reciba la señal es similar al caso anterior. Se han utilizado optoacopladores ya que la intensidad recibida por las boyas es inferior a 20mA, intensidad mínima para activar el relé de 12VDC. La tensión de activación de los optoacopladores es muy inferior y son activados sin ningún problema al alcanzar el agua el nivel de cada boya.

Finalmente tenemos un relé programable, el cual activa o desactiva el relé en función de la hora y la configuración establecida. De forma similar conectamos los 0V de Arduino y un pin digital de entrada.



16 Esquema de maniobra

En cuanto a la parte de fuerza, todos los actuadores funcionan a 12VDC. Para poder activar tanto la bomba como los led rojo, verde y azul utilizamos 3 relés de 5VDC activados por señales digitales de salida de Arduino. Los leds amarillo y blanco son activados directamente por el selector.



17 Esquema de potencia

3.1.4. Funcionamiento

A continuación, se va a explicar el funcionamiento de cada uno de los modos de trabajo del sistema.

A) Modo apagado

Tal y como se exponía en las especificaciones, en este modo de funcionamiento el sistema permanecerá estático a la espera de que se active algún modo de funcionamiento.

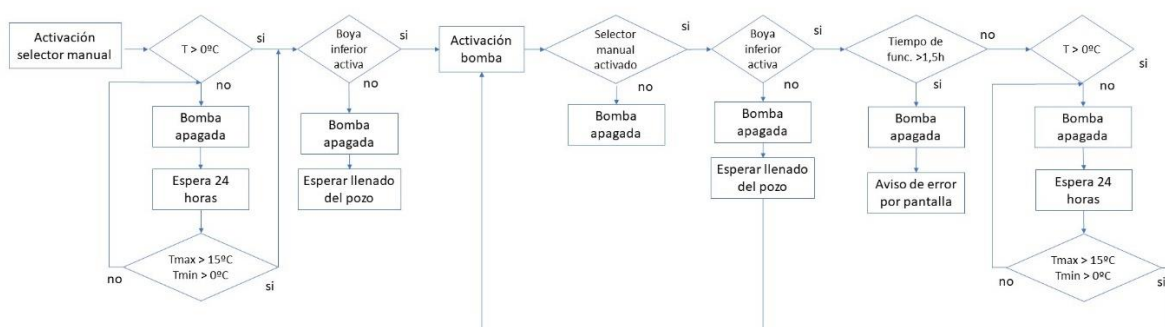
B) Modo manual

Al seleccionar el primer selector se activará el modo manual de funcionamiento. Una vez seleccionado, la bomba se activará siempre y cuando la temperatura sea mayor de 0°C y la boya inferior esté activa. Una vez iniciado el bombeo, el sistema permanecerá activo siempre que den las siguientes condiciones:

Tabla 7 Condiciones de funcionamiento en modo manual

Condiciones de funcionamiento
Selector manual activo
Temperatura > 0°C
Contador de funcionamiento de la bomba < 1.5 horas (evitar sobrecalentamiento de la bomba)
Boya baja activa (bañada por el agua)

En el siguiente diagrama de estados se puede observar el funcionamiento del modo manual del sistema.



18 Diagrama de estados modo manual

En el caso de que alguna de ellas no se cumpla, la bomba se parará y se mostrará por pantalla el motivo. En el caso de que la boya inferior no esté bañada por el agua, inactiva, el sistema parará la bomba para evitar que trabaje en vacío y se pueda dañar. En la siguiente ilustración podemos ver esta situación.



19 Sistema parado por nivel de agua bajo

Si el tiempo de funcionamiento excede el tiempo máximo de funcionamiento marcado por el fabricante, 1.5 horas seguidas, el sistema parará la bomba y mostrará un mensaje de error por pantalla.

Tal y como se comentaba anteriormente, la temperatura es un parámetro crítico para el sistema ya que si bombeamos con las tuberías heladas podríamos dañar la bomba. Por ello, en caso de que la temperatura ambiente descienda por debajo de 0°C el sistema parará la bomba y comenzará un periodo de espera de 24h. Durante este tiempo, el sistema registrará la temperatura mínima y máxima que haya habido. Si tras este tiempo la temperatura mínima registrada es menor o igual a 0°C o la temperatura máxima no supera los 15°C se repetirá de nuevo este periodo de espera de 24h. Esto se repetirá de forma indefinida hasta que se cumplan ambas condiciones. El motivo de que exista una temperatura máxima a superar es para asegurarnos de que, en caso de helada, la temperatura ha subido lo suficiente como para deshelar las tuberías y poder bombear agua con seguridad.

C) Modo automático

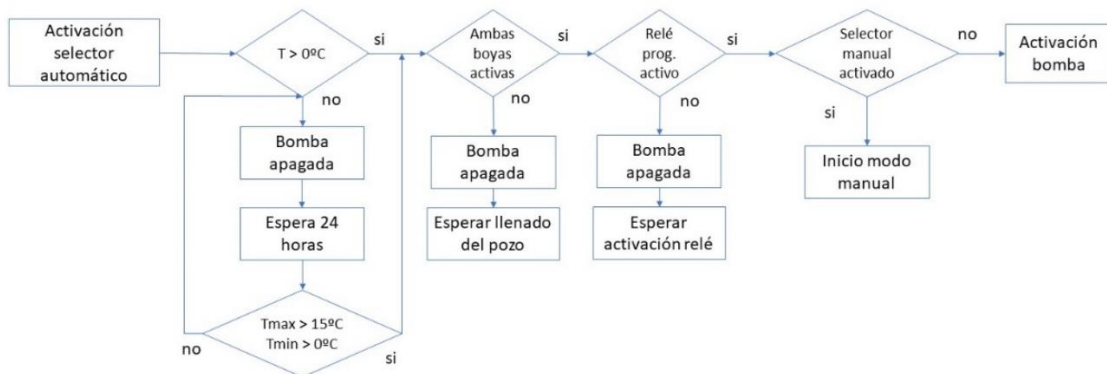
Este modo será activado al girar el segundo selector. Una vez activado, el sistema gestionará de forma automática la extracción del agua del pozo atendiendo a una serie de condiciones.

Una vez activado el selector, el bombeo comenzará siempre y cuando se den las condiciones que aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 8 Condiciones inicio bombeo automático

Condiciones para el inicio del bombeo
Selector automático activo
Selector manual inactivo
Relé programable activado
Temperatura > 0°C
Ambas boyas activas (bañadas por el agua)

En el siguiente diagrama de estados podemos observar el proceso para la activación de la bomba.



20 Diagrama de estados modo a utomático

En el caso de que la temperatura descienda de 0°C el sistema comenzará un ciclo de 24 de forma similar al caso anterior.

Para la activación de la bomba, es necesario que ambas boyas de nivel (alta y baja) estén activas y así asegurarnos que el pozo está lleno antes de comenzar. En la siguiente imagen puede verse esta situación, en la que el sistema está esperando que ambas boyas estén activas.



21 Sistema esperando que se alcance el nivel de agua óptimo

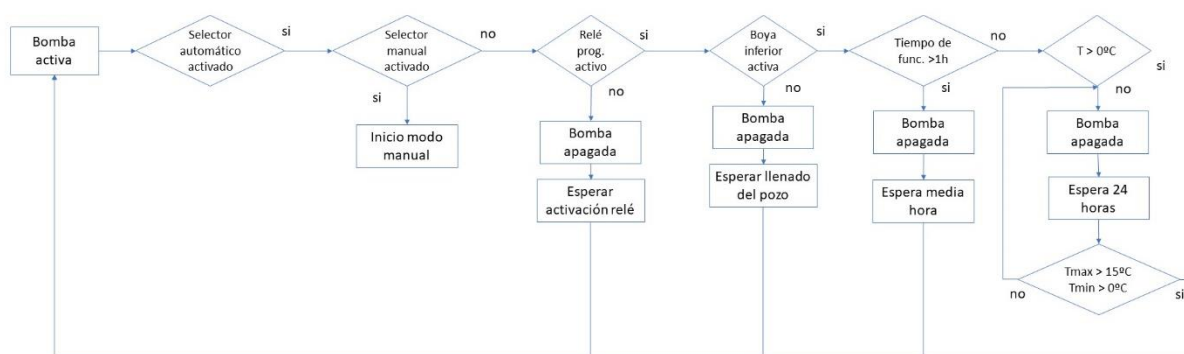
Por último, será necesario que el relé programable esté activo y así nos aseguremos que estamos dentro de las horas pico solares.

Una vez activada la bomba, esta continuará extrayendo agua mientras se den las siguientes condiciones:

Tabla 9 Condiciones para el ciclo de bombeo

Condiciones para el ciclo de bombeo
Selector automático activo
Selector manual inactivo
Relé programable activado
Temperatura > 0°C
Boya inferior activa
Contador de funcionamiento de la bomba < 1 h

En el siguiente diagrama podemos analizar el ciclo de extracción de agua.



22 Diagrama de estados modo a automático

En el caso de que el relé programable se desactive durante el ciclo de extracción de agua el sistema parará y esperará hasta que se vuelva a activar. Una vez iniciado el bombeo este seguirá, siempre y cuando se den el resto de condiciones, hasta que el agua llegue a la boya de nivel bajo. Una vez se de este hecho, el sistema esperará hasta que el pozo se vuelva a llenar hasta la boya de arriba y así comenzar el ciclo de nuevo.

Para proteger la bomba frente a sobrecalentamiento, el sistema trabajará durante una hora seguida y esperará media para su refrigeración. El límite máximo marcado por el fabricante es de 1.5h de funcionamiento continuado, por lo que restringimos su uso máximo media hora por seguridad.

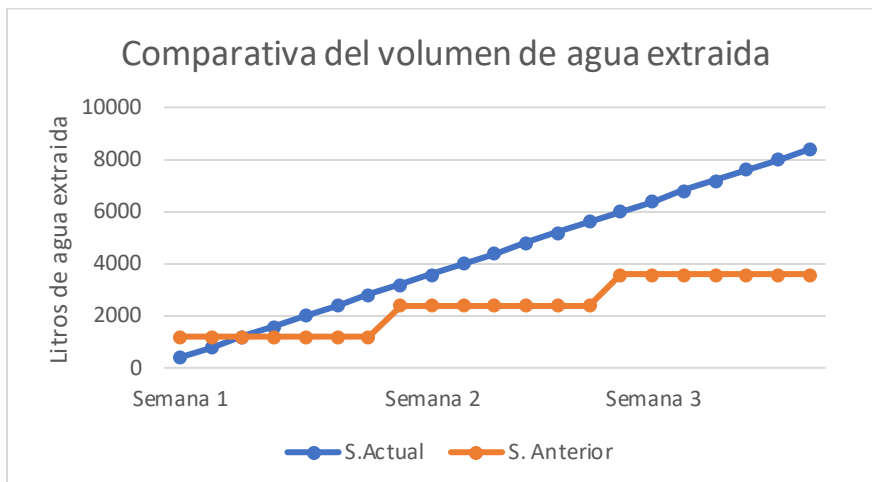
En el caso de que ambos selectores se activen a la vez, tendrá prioridad el sistema manual sobre el automático y será este primero en que entrará en funcionamiento.

3.1.5. Resultado

Mediante la el sistema descrito en el apartado anterior conseguimos un funcionamiento robusto tanto en el modo manual como en el modo automático. Este último nos permitirá aumentar el caudal de agua extraída del pozo de forma notable.

Anteriormente, se extraía agua una vez a la semana aproximadamente de forma manual. El volumen total de agua semanal era de unos 1200l aproximadamente. Gracias a este sistema, el

agua extraída es de unos 400l de media diariamente. Esto implica que semanalmente aumentamos el volumen total de agua de riego en 1600 litros. En la siguiente gráfica podemos ver una comparativa del rendimiento de ambos sistemas durante tres semanas:



23 Comparativa del volumen de agua extraído con ambos sistemas

A continuación, realizamos un estudio económico de este sistema. En la siguiente tabla se recopila el coste de todos los componentes utilizados:

Tabla 10 Componentes sistema extracción agua

Componente	Unidades	Coste unitario	Coste total
Arduino Uno	1	22 €	22,00 €
Caja eléctrica 1	1	2,50 €	2,50 €
Caja eléctrica 2	1	4 €	4,00 €
Relé 5VDC	3	5 €	15,00 €
Relé 12VDC	2	7 €	14,00 €
Módulo optoacopladores	1	2,5	2,50 €
Pantalla LCD	1	1,5	1,50 €
Módulo I2C pantalla	1	0,6	0,60 €
Led	5	1 €	5,00 €
Selector	2	1 €	2,00 €
Prensaestopas	6	0,4	2,40 €
Carril din (1 metros)	1	2	2,00 €
Cable 6mm2 (5 metros)	1	2,5	2,50 €
Cable 0,75mm2 (5 metros)	1	6	6,00 €

82 €

El coste por m3 de agua en Soria es de 0.96€. Semanalmente, generamos 1.6m3 de agua extra del pozo que de otro modo deberían haberse comprado.

Con el Periodo de Recuperación o Payback, podemos analizar en cuanto tiempo se recuperará la inversión realizada en dicho sistema:

$$Payback = I0/F = 86 / (0.96 \times 1.6) = 54 \text{ semanas}$$

Donde:

- I_0 : es el valor de la inversión
- F : valor de los flujos de caja

Podemos concluir que en un año aproximadamente habremos recuperado la inversión de este sistema. Por otro lado, también debemos considerar la variable ecológica de nuestro sistema, ya que estamos dejando de consumir agua de red para el riego, obteniéndola de caudales de agua subterránea mediante energía solar.

Este tipo de sistemas no existen en el mercado a nivel general y en su gran mayoría deben ser realizados de forma específica para cada aplicación. Esto implica que el coste de un sistema similar adquirido en el mercado sería mucho más alto que el actual, llegando a cuadruplicar el coste actual.

En cuanto al coste relacionado con el sistema fotovoltaico, en la siguiente tabla podemos ver el coste de cada uno de los elementos. Gracias a este podemos alimentar el conjunto del subsistema de extracción de agua sin depender la red eléctrica, ya que nuestra instalación no tiene acceso a la misma, además de tener un consumo de energía 100% renovable. El uso de este sistema de energía solar nos permite un ahorro doble, por un lado, el consumo eléctrico de nuestro sistema y por otro la instalación a la red eléctrica que hubiese sido necesaria si no contáramos con él.

Tabla 11 Componentes sistema fotovoltaico para la extracción de agua

Componente	Unidades	Coste unitario	Coste total
Placa solar 50W	2	50 €	100,00 €
Controlador solar	1	5,00 €	5,00 €
Batería 12Ah	1	23 €	23,00 €
Cable 6mm ² (5 metros)	2	3 €	5,00 €

133 €

3.2. Sistema de riego

Al igual que en el apartado anterior, se va comentar el funcionamiento del sistema de riego explicando sus componentes, el funcionamiento de los mismos, así como el resultado obtenido.

Sistema de riego está formado por los siguientes elementos:

- Sistema de control.
- 2 placas solares de 50W y 12V.
- Controlador solar.
- Batería.
- Bomba de riego.
- Depósitos de almacenamiento de agua.
- Caudalímetro.
- Sensor ultrasonidos.
- Sonda de temperatura.

3.2.1. Especificación funcional

Este sistema deberá uniformizar la presión de riego en todo el sistema de goteo. Para ello usará una bomba de presión alimentada directamente por placas fotovoltaicas, sin necesidad de usar baterías. El sistema monitorizará las horas solares pico y activará la bomba solo dentro de esta ventana horaria. Esta bomba deberá tener al menos un caudal de 12 litros minuto y proporcionar una presión mayor a 2 bares.

Para evitar problemas con las tuberías heladas, solo funcionará si la temperatura es mayor de 0°C. Si la temperatura desciende por debajo de este umbral el sistema deberá asegurarse que no hay riesgo de que haya tuberías heladas cuando vuelva a funcionar. Además, deberá poder medir el caudal de agua suministrado por la bomba, así como los l/m² de lluvia.

Deberá respetar el tiempo de funcionamiento de la bomba para evitar sobrecalentamiento. En cuanto a la interfaz con el usuario, contará con 5 leds que mostrarán los diferentes estados y alertas del sistema. Por otro lado, contará con una pantalla por la cual se mostrará toda la información disponible en cada uno de los estados o modos de trabajo.

En este sistema contaremos con tres modos de funcionamiento. Estas serán las funciones cada uno de ellos:

A) Modo de funcionamiento apagado

En este modo de funcionamiento el sistema permanecerá estático, mostrando por pantalla la temperatura actual y el modo de funcionamiento. Permanecerá así hasta que sea activado algún otro modo de trabajo.

B) Modo de funcionamiento manual

Este modo de funcionamiento será activado por el usuario al girar el selector correspondiente. Este modo de uso será utilizado para regar de forma manual en situaciones puntuales. Una vez activado, la bomba comenzará a funcionar siempre y cuando se den las condiciones correspondientes. En este sistema el modo manual también tiene prioridad sobre el automático, por lo que si ambos se activan a la vez tendrá prioridad el manual.

C) Modo de funcionamiento automático

Al activar este modo de funcionamiento, haciendo uso del selector correspondiente, el sistema gestionará el riego de forma automática sin necesidad de intervención humana. Cada ciclo de riego durará media hora y se ejecutará una vez al día.

3.2.2. Componentes

Como controlador de este sistema también se ha elegido una placa de Arduino, en este caso el modelo Mega. Este modelo tiene un funcionamiento muy similar al utilizado en el anterior caso, pero con un mayor número de pines, y por tanto una mayor capacidad para conectar sensores y actuadores. Cuenta con 54 pines digitales, 16 analógicos y 4 puertos serie y tiene el microcontrolador Atmega2560. Se ha elegido este modelo ya que en este caso el número de sensores y actuadores es mayor, y de este modo nos aseguramos no limitar al sistema en caso de necesitar ampliarlo. El consumo de energía de este modelo de Arduino es muy reducido también, por lo que se ajusta perfectamente a nuestras necesidades.

24 Arduino Mega¹³

En este caso tendremos también una sonda de temperatura DS18B20, similar a la utilizada en el apartado anterior, ya que se ajusta perfectamente tanto a las necesidades como a su uso con Arduino.

Para controlar las horas pico solares utilizaremos un relé programable y para elegir los modos de funcionamiento el sistema contará con dos selectores manuales, de forma similar al caso anterior.

Este sistema contará con un caudalímetro para medir el flujo de agua de riego. Se ha utilizado un caudalímetro modelo YF-B1. Este caudalímetro cuenta con un rotor de paletas en su interior con un imán fijado en el mismo. Al fluir el agua a través de él, hace girar al rotor y mediante un sensor hall detectamos el paso del imán. Esto produce una onda cuadrada proporcional al caudal que lo atraviesa. Para calcular el caudal debemos calcular la frecuencia de la señal digital generada por el sensor. Esto lo realizamos mediante interrupciones en el código de Arduino, contando los pulsos en una determinada franja de tiempo.

Se ha utilizado este ya que el rango de caudal aceptado, 1-30 l/min, se ajusta a nuestras necesidades y es compatible con Arduino gracias a la programación comentada. Este caudalímetro se encuentra a la salida de la bomba, por lo que permite medir el total del caudal de riego.

Por otro lado, tendremos un sensor de ultrasonidos para medir el volumen de agua de lluvia. Este sensor se encontrará posicionado en lo alto de un pequeño depósito al cual haremos llegar el volumen de agua de lluvia recogida por un área conocida. El sensor medirá la altura de la columna de agua en cada momento, y de este modo conoceremos el volumen de agua total que ha llovido. Al ser recogida por un área conocida podremos calcular los l/m² que han llovido. El modelo utilizado ha sido HC-SR04, ya que es totalmente compatible con Arduino y tiene una precisión de aproximadamente 0.3cm, suficiente para nuestra aplicación.

25 Sensores¹⁴

¹³ Fuente de la imagen: <https://solectroshop.com/es/serie-arduino-basica/2001-arduino-mega-original-2560-rev3.html>

¹⁴ Fuente de la imagen: <https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/SSHUF12/sensores/>

En cuanto a los actuadores, contaremos con una pantalla LCD 20x4 para mostrar los mensajes correspondientes en cada modo de funcionamiento o estado.

Este sistema contará con 4 luces led, que indicarán al usuario de forma visual el estado del sistema.

Finalmente, contaremos con una bomba de presión de 12V y 96W, controlada por Arduino a través de un relé de alta potencia. La bomba elegida ha sido una bomba de presión de la marca Seaflo ya que está diseñada para ser conectada directamente a placas fotovoltaicas. Esta bomba genera una presión de 2.4 bares y un caudal de 12.5 litros por minuto.

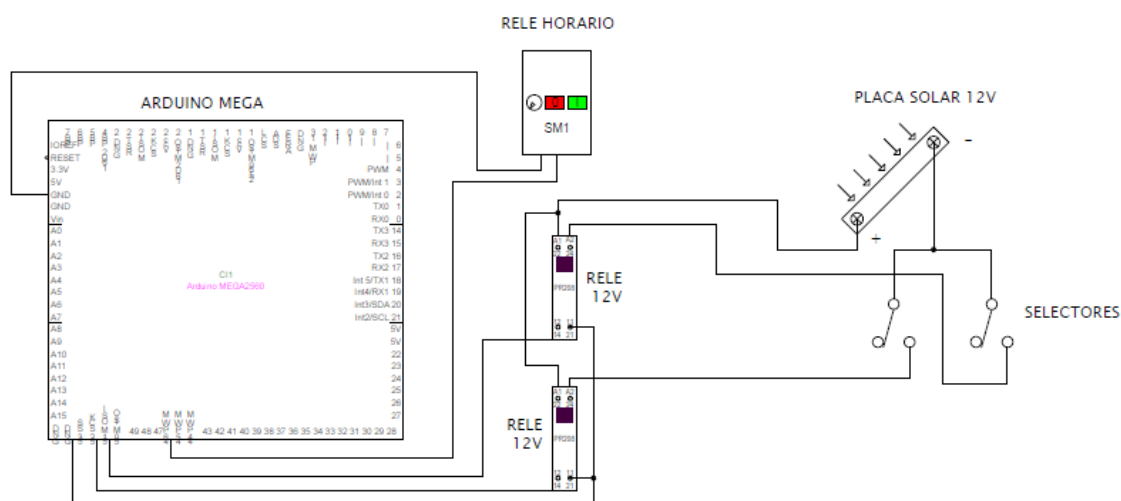
3.2.3. Estructura e interconexiones

Para comentar la estructura del sistema, diferenciaremos la parte de potencia y la parte de maniobra.

Las placas solares de esta instalación proporcionan una tensión de 12V y Arduino Mega trabaja a una tensión de 5V. Al igual que en el caso anterior, utilizaremos relés de 12VDC para salvar esta diferencia de tensión y proteger nuestro controlador.

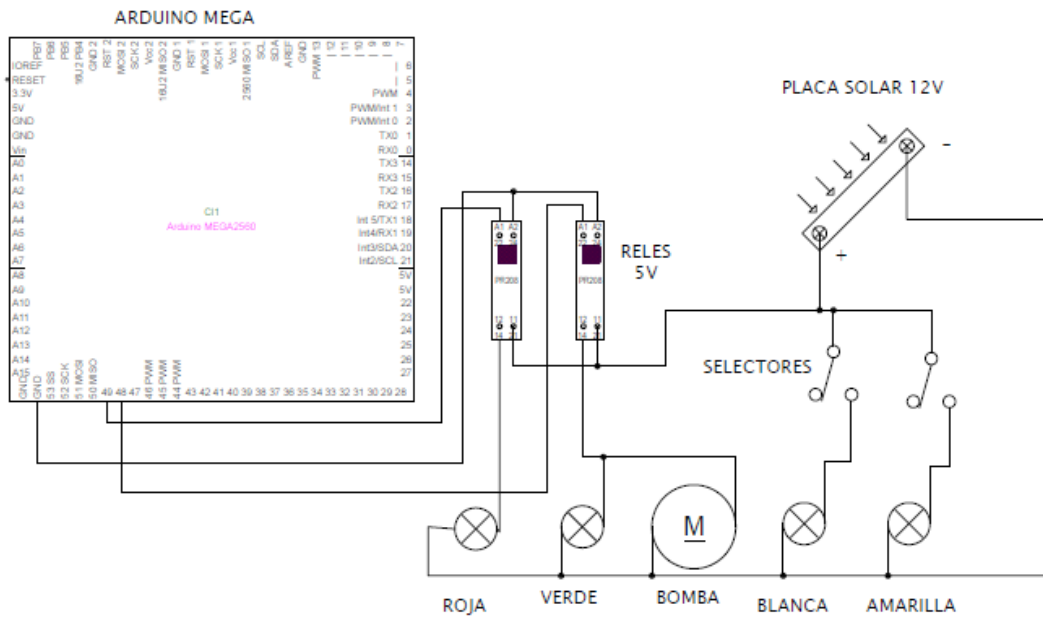
La parte de maniobra de este sistema es similar al sistema de extracción de agua, contando con dos selectores que activan dos relés de 12V. La parte de carga de los relés tiene conectados los 0V de Arduino, que recibe un pin digital configurado como entero pull-up cada vez que activamos cada selector.

También contamos con un relé programable en cuyos bornes se ha conectado los 0V de Arduino y un pin digital de entrada.



26 Esquema de maniobra

En cuanto a la parte de potencia, en este sistema contamos con dos relés de 5V activados por Arduino los cuales activan un led y un conjunto bomba y led respectivamente. Los led blanco y amarillo, que indican cada modo de funcionamiento, se activan directamente con el selector correspondiente.



27 Esquema potencia

3.2.4. Funcionamiento

Como comentábamos anteriormente, contaremos con tres modos de funcionamiento diferentes en este sistema.

A) Modo apagado.

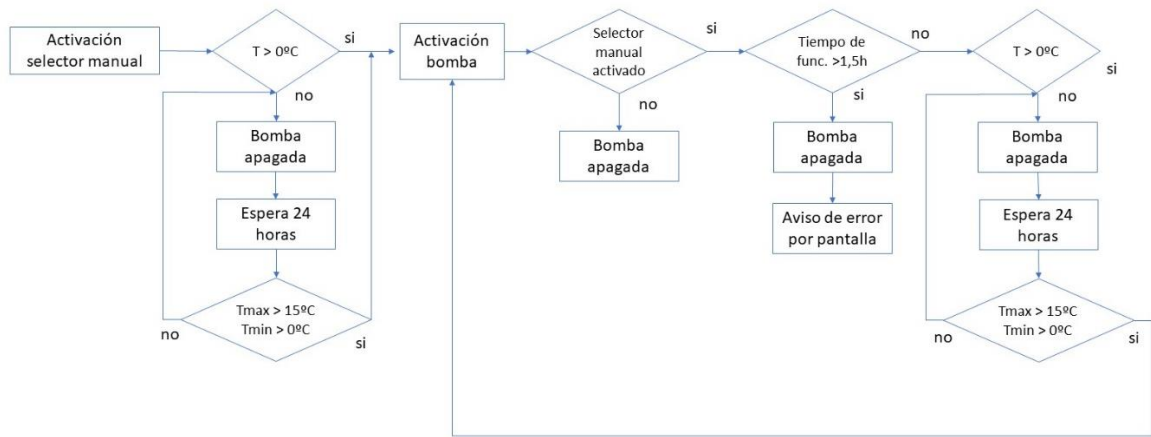
En este caso el sistema permanecerá sin realizar ninguna función. Simplemente mostrará la temperatura por pantalla a la espera de que algún modo de funcionamiento diferente sea activado.

B) Modo manual

Al girar el primero de los selectores activaremos el modo manual de funcionamiento.

Si la temperatura es mayor a 0°C la bomba se activará y el sistema comenzará a funcionar. En el caso de que la temperatura sea menor a 0°C sucederá lo mismo que en el sistema anterior, entrando en una espera de 24h con la bomba apagada y registrando las temperaturas máximas y mínimas durante este periodo.

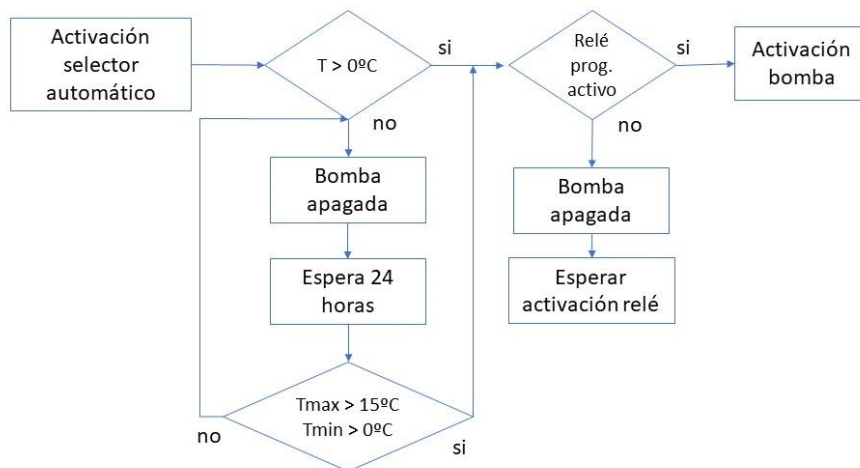
Si la bomba trabaja durante más de hora y media el sistema se parará y entrará en un estado de alerta para proteger la bomba de sobrecalentamiento.



28 Diagrama de estados modo manual

C) Modo automático

Será activado al utilizar el segundo selector. Si la temperatura es mayor a 0°C y el relé programable está activo la bomba se encenderá y comenzará el ciclo de riego.



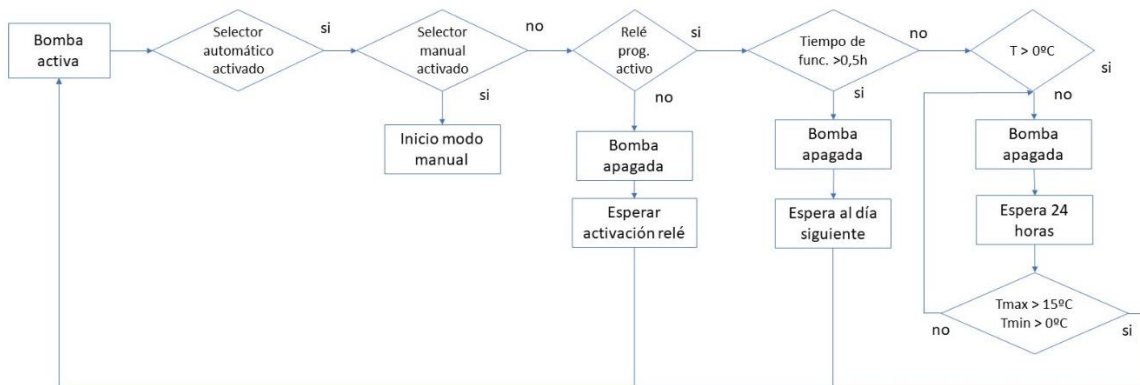
29 Diagrama de estados para inicio del modo automático

Si el relé programable se encuentra inactivo el sistema permanecerá en reposo a la espera de que se active, como puede observarse en la siguiente imagen.



30 Sistema en modo de espera

En el siguiente esquema podemos ver el funcionamiento del ciclo de riego de la bomba.



31 Diagrama de estados del ciclo de riego modo automático

Durante el ciclo de riego la bomba será activada durante media hora y transcurrido este tiempo esperará hasta el día siguiente. Este tiempo es suficiente para regar los árboles dada la presión de la bomba utilizada.

3.2.5. Resultado

El objetivo buscado es estandarizar el caudal de riego en todos los árboles de la finca. Con el sistema de riego anterior, por presión hidrostática, el flujo de agua era de unos 10 l/minuto. El problema era la desigualdad de riego existente entre unos árboles y otros en función de su posición. Los árboles con mayor caudal alcanzaban un flujo de agua de riego de 0.15 l/min y los que menos en torno a 0.05 l/min. Esto provoca una diferencia importante en el crecimiento de unos árboles frente a otros como puede apreciarse en la siguiente imagen, según nos alejamos del depósito la presión en el gotero es menor y por tanto el volumen de agua de riego, provocando un menor desarrollo de los árboles.



32 Diferencia tamaño de árboles

Mediante el desarrollo de este sistema de riego por bombeo alcanzamos un flujo de agua de 15l/minuto, y el caudal de agua de riego se estabiliza en todos los árboles en 0.15 l/min. Además de estabilizar el caudal de agua por árbol aumentamos el flujo de agua total permitiendo regar el conjunto de la finca en menos tiempo.

En la siguiente tabla aparecen todos los elementos utilizados para realizar este sistema así como su coste.

Tabla 12 Listado componentes sistema riego

Componente	Unidades	Coste unitario	Coste total
Arduino Mega	1	35 €	35,00 €
Caja eléctrica 1	1	2,50 €	2,50 €
Caja eléctrica 2	1	4 €	4,00 €
Rele 5VDC	3	5 €	15,00 €
Rele 12VDC	2	7 €	14,00 €
Pantalla LCD	1	1,5	1,50 €
Módulo I2C pantalla	1	0,6	0,60 €
Led	5	1 €	5,00 €
Selector	2	1 €	2,00 €
Prensaestopas	6	0,4	2,40 €
Carril din (1 metro)	1	2	2,00 €
Cable 6mm ² (5 metros)	1	2,5	2,50 €
Cable 0,75mm ² (5 metros)	1	6	6,00 €

93 €

Por otro lado, tenemos el coste de la bomba de presión:

Tabla 13 Bomba de presión

Componente	Unidades	Coste unitario	Coste total
Bomba de presión	1	52	52,00 €

El coste total del conjunto será de 145€.

En el mercado existen soluciones para el problema que hemos analizado y solucionado. Un ejemplo de ello es el sistema de presión Gardena, con un coste de 300€.



33 Bomba de presión Gardena ¹⁵

Este sistema permite crear una programación básica para el riego, añadiendo presión al sistema gracias a su bomba eléctrica. No tiene en cuenta condiciones ambientales, tales como la temperatura y necesita la red eléctrica para su funcionamiento.

Nuestro sistema supone un coste de menos del 50% frente a este sistema comercial. Además, nos permite contar con una serie de sensores totalmente personalizados a nuestra aplicación y deja abierta la puerta a la ampliación de los sensores según sea necesario.

Por otro lado, gracias al diseño realizado, el conjunto del sistema es alimentado por energía solar, siendo 100% autónomo de la red eléctrica. Esto nos permitirá un ahorro añadido ya que de otro modo hubiera sido necesario realizar una instalación eléctrica desde la red y asumir el coste mensual de la potencia consumida. En la siguiente tabla podemos ver el coste de cada uno de los elementos:

Tabla 14 Componentes sistema fotovoltaico para el riego

Componente	Unidades	Coste unitario	Coste total
Placa solar 50W	2	50 €	100,00 €
Controlador solar	1	5,00 €	5,00 €
Batería 12Ah	1	23 €	23,00 €
Cable 6mm2 (5 metros)	2	3 €	5,00 €

133 €

¹⁵Fuente de la imagen: <https://www.multitanks.com/es/riego/bombas-de-riego/1698-kit-gardena-bomba-de-presion-inteligente.html>

4. Sistema IOT

En los apartados anteriores se han definido los componentes y sistemas necesarios para contar con un sistema automático de extracción y riego de agua. Sin embargo, solo es posible la visualización y manipulación de dichos sistemas in situ.

Por ello, se hace muy importante el poder acceder de forma remota a este sistema, ya sea tanto para conocer las condiciones actuales como para poder cambiar el funcionamiento del mismo si es necesario. En este apartado se va a definir el sistema IOT que permitirá tanto reportar datos de forma remota como recibir instrucciones que permitan cambiar el funcionamiento del sistema de riego.

4.1. Especificaciones funcionales

El sistema de monitorización de datos y control remoto deberá recopilar los datos de los sensores del sistema de riego y enviarlos de forma remota a una interfaz de usuario donde serán almacenados y estarán disponibles para el uso del agricultor. Estos datos, antes de ser enviados, deberán ser almacenados de forma temporal y enviar una media de los últimos valores cada 15 minutos para reducir el volumen de datos enviados.

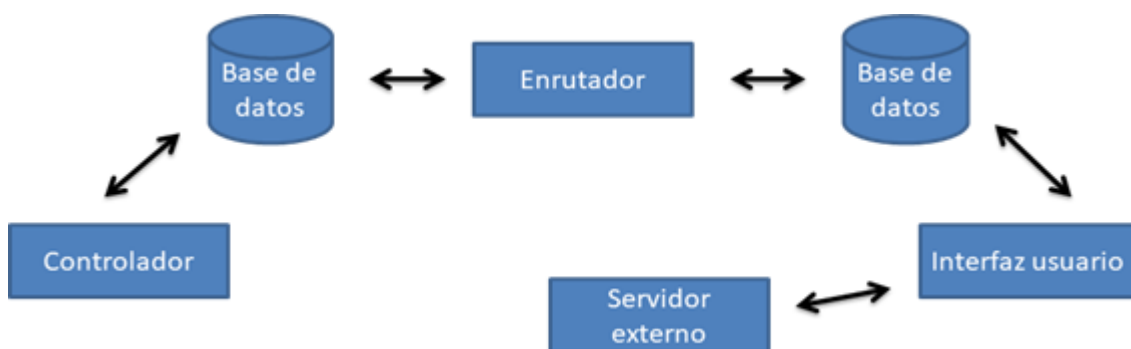
La interfaz de usuario almacenará los datos recibidos de forma permanente y los mostrará gráficamente. Dicha interfaz se encontrará en una red diferente al sistema de riego. Además de estos datos, recibiremos de un servidor externo todos los datos atmosféricos que completa los ya generados por nuestro sistema, como por ejemplo una previsión semanal del tiempo.

Por otro lado, esta interfaz contará con una serie de selectores que permitirán controlar el sistema de riego de forma remota. Dentro de estas funciones contaremos con la elección del modo de funcionamiento (automático o manual) o un apagado general del sistema de riego. Estas acciones serán enviadas al sistema de riego y este cambiará su modo de funcionamiento en base a ellas, además de enviar de vuelta una confirmación que será mostrada en la interfaz de usuario.

Todos los datos recibidos, tanto los generados por el sistema de riego como los externos, junto con los selectores disponibles para tomar las acciones remotas serán dispuestos de forma centralizada en la interfaz de usuario para el uso del agricultor. Finalmente, el sistema deberá alertar vía email al agricultor en caso de que la temperatura descienda por debajo de 0°C.

4.2. Arquitectura del sistema IOT

Los datos generados por el sistema de riego serán almacenados en una base de datos de forma temporal. Estos serán enviados a través de un enrutador que los hará llegar hasta una segunda base de datos donde serán almacenados de forma permanente. La interfaz de usuario tomará los datos de esta base de datos y de un servidor externo.



34 Esquema de la arquitectura del sistema

En nuestro proyecto, Node Red nos permite interconectar todos los dispositivos, protocolos de Internet y bases de datos utilizados de una forma sencilla. De este modo, Node Red forma la estructura principal de la arquitectura del sistema IOT, gestionando el flujo de datos desde origen a fin en ambos sistemas.

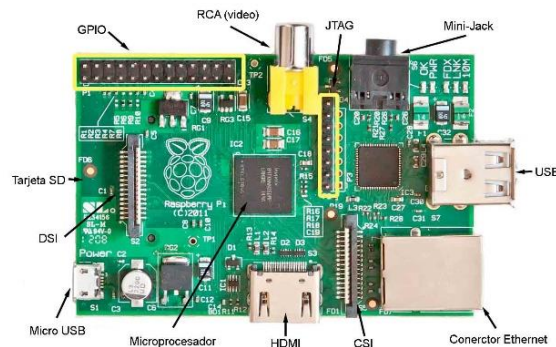
El hardware de este sistema está basado en las placas de Raspberry Pi. Se ha decidido utilizar esta placa por su versatilidad de uso, tanto en tipos de software como en conectividad, así como su potencia. El protocolo de comunicaciones elegido para transmitir la información es MQTT. Este protocolo nos permite realizar dicha comunicación de una forma ágil y ligera, siendo muy adecuado para aplicaciones de IOT.

Para el almacenamiento de los datos se ha decidido utilizar InfluxDB, ya que es una herramienta de código abierto que nos permite gestionar bases de datos y se integra perfectamente con el hardware elegido. Por último, para la visualización de los datos se ha elegido utilizar Grafana, ya que cuenta con una buena integración con las bases de datos de InfluxDB y cuenta con una gran variedad de herramientas de visualización de datos.

4.2.1. Raspberry Pi

El hardware utilizado para nuestro sistema IOT estará basado en la placa Raspberry Pi. Esta es un ordenador de placa reducida o de placa única desarrollado en Reino Unido por Raspberry Pi Foundation. Se diseñó con el objetivo de fomentar el estudio de informática en las aulas, pero su uso se hizo mucho más popular, usándose para una gran variedad de proyectos incluso en el área industrial.

En todas sus versiones, incluye un procesador Broadcom, memoria RAM, GPU, puertos USB, HDMI, Ethernet, Bluetooth, pines GPIO y un conector para cámara. Ninguna de sus ediciones incluye memoria, siendo esta una tarjeta MicroSD.



35 Partes de una placa Raspberry Pi ¹⁶

El software utilizado es de código abierto, siendo su sistema operativo oficial una versión adaptada de Debian, denominada Raspberry Pi OS o Raspbian, aunque permite usar otros sistemas operativos, incluido una versión de Windows 10 o una versión de Android.

Para este proyecto, utilizaremos dos modelos diferentes de Raspberry Pi, ambos haciendo uso del software libre Raspbian. Dicho software debe ser cargado en la tarjeta micro SD que actúa como memoria antes de comenzar con su uso.

Se ha decidido el uso de Raspberry Pi por presentar una gran versatilidad de uso para diferentes herramientas de IOT, así como su conexión a una red WIFI. El software Raspbian es compatible con una gran cantidad de programas y tiene una gran red de colaboradores en internet que trabajan para mejorar el uso de este software y ampliar su funcionalidad.

Gracias a su bajo consumo, reducido tamaño y potencia de computación, la Raspberry Pi se utiliza en una gran cantidad de proyectos de IOT y existe una amplia bibliografía para su uso en este ámbito. Además, permite una comunicación con Arduino gracias a sus puertos USB

Para el sistema ubicado en la propia finca, se ha decidido utilizar una Raspberry Pi Zero W. Este es el modelo más reducido con conexión wifi de la familia, tanto en tamaño como en consumo, haciéndolo el más adecuado para esta aplicación. A pesar de su reducido tamaño, es un 40% más potente que el primer modelo de Raspberry. Tiene un microprocesador Broadcom BCM2835, que funciona a 1GHz con un solo núcleo. Posee 512MB de RAM y debido a su tamaño sustituye el puerto HDMI por MiniHDMI, manteniendo así las prestaciones. Tampoco usa USB estándar, sino que tiene dos MicroUSB, uno de alimentación y otro de datos. Su letra W proviene de su conexión a internet, Wireless.

Para el sistema que se encuentra en el domicilio, donde el consumo eléctrico no es una restricción y necesitamos mayor potencia de computación para la visualización de los datos y control del cuadro de mando, utilizaremos una Raspberry Pi B3+. Cuenta con un procesador de 1.4Ghz y en cuanto a la conectividad inalámbrica ahora incorpora doble banda a 2,4GHz y 5GHz.

¹⁶Fuente de la imagen: <https://www.zonamaker.com/raspberry/raspberry-pi/intro-raspberry>



36 Modelos de Raspberry Pi: 3B+ (izquierda) y Zero W (derecha) ¹⁷

4.2.2. Node Red

La arquitectura de este sistema IOT está basada en Node Red. Este es una herramienta de programación visual de código abierto que permite la gestión y procesamiento de datos en tiempo real. Fue creada por Nick O’Leary y Dave Conway-Jones del grupo de Servicios de Tecnologías Emergentes de IBM en el año 2013.

Permite conectar diferentes tipos de hardware a través de todo tipo de protocolos, APIs o servicios de Internet. Gracias a su sencillez de uso, simplifica enormemente la tarea de programación gracias a su programación visual, robustez y bajos recursos de cómputo se ha consolidado como un framework de referencia para proyectos de IOT e Industria 4.0.

Para su programación se hace uso de una interfaz gráfica en la que debemos conectar diferentes tipos de nodos, los cuales nos permiten interconectar todo tipo de dispositivos, protocolos o servicios de internet en la nube. Existe una gran comunidad detrás que contribuye desarrollando nodos para una gran cantidad de fines. En la actualidad existen unos 225.000 nodos disponibles en el repositorio de Node Red.

Además, permite la escalabilidad del sistema, dejando la puerta abierta para conectar más equipos si fuese necesario, así como observar el estado de todos los nodos en tiempo real.

Finalmente, cabe destacar la facilidad de integración de Node Red con la Raspberry Pi, ya que está disponible en el propio software Raspbian. Además, permite acceder a los puertos USB o GPIO de esta placa a través de los nodos diseñados para ello.

4.2.3. MQTT

Este protocolo de comunicaciones se ha convertido en un referente para aplicaciones de IOT por su sencillez y ligereza. Esto adquiere gran relevancia en los proyectos de IOT donde los equipos utilizados tienen limitaciones de potencia, consumo y ancho de banda.

MQTT son las siglas MQ Telemetry Transport. Es un protocolo de comunicación M2M (máquina a máquina) de tipo cola de mensajes.

Fue creado en 1999 por Andy Stanford-Clark con el objetivo de conectar dispositivos en la industria petrolera.

¹⁷ Fuente de la imagen: <https://hardzone.es/reviews/perifericos/analisis-raspberry-pi-3-modelo-b/>

Este protocolo es utilizado en este proyecto para el intercambio de datos entre la Raspberry Pi situada en la finca y el otro modelo de Raspberry Pi situado en el domicilio. Las restricciones tanto de energía como de ancho de banda (3G) o de potencia de la propia Raspberry Pi Zero hacen que sus bajos requerimientos sean ideales para este proyecto.

El funcionamiento de este protocolo es un servicio de mensajería con patrón publicador/suscriptor. Los mensajes son conectados a través de un servidor central llamado broker.

Los mensajes se disponen en topics: un cliente puede publicar un mensaje en un determinado topic. Otros clientes pueden suscribirse a este topic y el broker le hará llegar los mensajes suscritos.

MQTT tiene tres niveles de calidad de servicio, que hace referencia a la forma de gestionar la robustez del envío de los mensajes. Los niveles son:

- Nivel 0: el mensaje se envía una única vez. En caso de fallo no se entrega.
- Nivel 1: el mensaje se envía hasta que se entrega. Puede recibirse varias veces el mensaje.
- Nivel 2: se entrega una única vez al receptor.

En este proyecto se ha elegido un nivel de servicio 2 para asegurar que llegan todos los mensajes de una forma exacta. Esto es importante porque tanto en caso de que no llegara como de que llegara varias veces podríamos actuar de manera equívoca sobre el sistema y que actuara de forma incorrecta.

Por otro lado, el protocolo MQTT dispone de distintas medidas de seguridad que podemos adoptar para proteger las comunicaciones. Por ejemplo, se puede implementar transporte SSL/TLS y autenticación por usuario y contraseña. Sin embargo, esto implica una mayor carga de proceso. No ha sido implementado ninguna medida de seguridad, ya que exigiría una mayor carga en las comunicaciones.

Node Red cuenta con un nodo específico para este protocolo, y nos permite configurar fácilmente la comunicación de diferentes equipos a través de él. La comunicación de datos a través de MQTT se realizará entre las dos Raspberry Pi, las cuales cuentan con la configuración de Node Red establecida.

Cada una de ellas se encontrará en una red diferente, por ello se ha decidido utilizar un broker global. En este proyecto se ha utilizado HiveMQ. Este servidor nos permite crear topic específicos para nuestro proyecto, así como enviar mensajes y suscribirnos de manera gratuita.

4.2.4. InfluxDB

Ambas Raspberry Pi cuentan con bases de datos para almacenar los mismos de forma temporal o persistente. Para ambos casos se ha contado con InfluxDB.

InfluxDB es una base de datos de series temporales de código abierto desarrollada por InfluxData. Esta especialmente diseñado para almacenar de manera eficiente una cantidad importante de información.

A parte de sus buenas cualidades para el almacenamiento de datos, así como ser de código abierto, ha sido elegido por su facilidad para conectar con Grafana y su uso con Raspberry Pi.

4.2.5. Grafana

Mediante la visualización de los datos mejoramos en gran forma la utilidad de los mismos y nos permite poder tomar decisiones de una forma mucho más rápida. La herramienta elegida para generar las gráficas ha sido Grafana.

Grafana es un software libre basado en licencia de Apache 2.0, que permite la visualización y el formato de datos métricos. Grafana nos permite una fácil integración con nuestras bases de datos de InfluxDB, además de una gran capacidad de personalización de la visualización de los datos y así como para crear estadísticas de los mismos.

4.3. Funcionamiento del sistema

Una vez comentada la arquitectura del sistema, vamos a comentar el funcionamiento del conjunto de dispositivos y subsistemas.

En primer lugar, dispondremos en la finca del sistema de riego autónomo controlado por un Arduino Mega. A este Arduino estarán conectados los diferentes sensores y actuadores, como veíamos en apartados anteriores. Además, se encontrará conectado a la Raspberry Pi Zero W, ya que ambos estarán conectados a través del puerto serie de ambos. Así Arduino hará llegar a la Raspberry Pi la información de los diferentes sensores gracias a la configuración de Node Red.

La Raspberry Pi Zero contará con conexión WIFI y hará llegar estos datos a la Raspberry Pi 3 a través del protocolo de comunicación MQTT. Para ello se disponen diferentes topics que veremos en los siguientes apartados con detalle. Todos ellos comenzarán por [iotfuentelmonge/]. El motivo por el cual todos comienzan de esta forma es para crear topics únicos, y más teniendo en cuenta el uso de un bróker global. De esta manera, añadiendo subtopics en función de los datos a enviar, podemos tener un conjunto de topics únicos que no interfieran con los mensajes de otros usuarios.

El bróker global HiveMQ se encargará de gestionar la transmisión de estos datos. La Raspberry Pi 3 recibirá los datos enviados y los almacenará para su posterior visualización a través de Grafana.

Sin embargo, nuestro objetivo no es solo mostrar estos datos sino crear un cuadro de mando en el cual tengamos disponible toda la información del sistema, así como las herramientas disponibles para su control remoto. Para ello, se ha decidido diseñar un cuadro de mando mediante Node Red e integrar las gráficas de Grafana en el mismo. De este modo contamos con una única herramienta donde podemos visualizar los datos y controlar nuestro sistema de forma remota.

Los datos enviados desde la Raspberry Pi 3 hasta Arduino con las acciones de control remoto serán gestionados de forma similar.



37 Esquema de funcionamiento del sistema IOT

4.4. Monitorización de datos

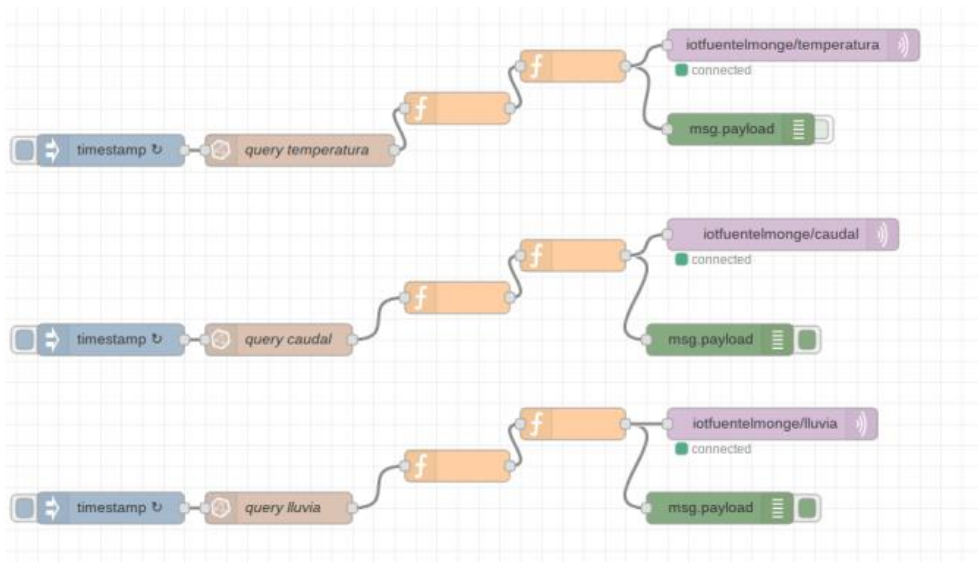
Como se ha comentado anteriormente, la instalación de riego se encuentra aislada y la única forma de conocer su estado es accediendo personalmente a la misma. Esto dificulta el seguimiento del riego de los árboles, así como la detección de potenciales problemas en la instalación.

Por ello, se ha desarrollado un sistema de recogida de datos críticos para la instalación y su posterior monitorización. Cada uno de los datos contará con un topic de MQTT único.

Los datos reportados a través de este flujo son:

- Caudal de agua de riego [l/min]. Topic: *iotfuente/monge/caudal*
- Temperatura [°C]. Topic: *iotfuente/monge/temperatura*
- Columna de agua de lluvia [cm]. Topic: *iotfuente/monge/lluvia*

La Raspberry Pi Zero recibe cada 4 segundos un conjunto de datos procedente de Arduino Mega, el cual almacena de manera temporal en una base de datos de InfluxDB. Cada 15 minutos se hace la media de los datos y se envían por MQTT a través del topic correspondiente, para reducir el volumen de datos enviados. En la siguiente imagen pueden verse los nodos encargados de realizar la media y enviar los datos a través de cada topic de MQTT.



38 Nodos Node Red para el envío de datos

Al contar con un nivel de calidad de servicio 2 en el protocolo MQTT nos aseguramos de que los datos llegaran únicamente una vez. Finalmente se limpian las bases de datos en cuestión para comenzar de nuevo con el almacenamiento temporal de los datos.

Estos datos son recogidos por la Raspberry Pi 3, la cual está suscrita a estos topic, y almacenados en tres bases de datos. Grafana toma estos datos y alimenta tres gráficas, una para los datos de cada topic. Mediante el registro y visualización de estos tres datos somos capaces de conocer la situación del riego de los árboles, monitorizando el volumen total de agua de riego, tanto de lluvia como de los depósitos, y así poder controlar el correcto desarrollo de estos.

Además de los datos recibidos del propio sistema, nuestro cuadro de mando recibe datos meteorológicos de AEMET. Para ello, se ha hecho uso de la API existente y se han creado los nodos necesarios para obtener dicha información. Los datos que obtenemos de esta fuente son:

- Previsión de temperatura para la semana.
- Hora de amanecer y de anochecer.
- Velocidad del viento.
- Estado del tiempo.

Estos datos complementan los registrados por el propio sistema y ayudan al usuario a conocer la situación atmosférica con mayor detalle, además de aportar una previsión para los días siguientes.

Toda esta información se integra dentro del cuadro de mando de Node Red. En la parte central se disponen las tres gráficas de Grafana embebidas. Estas se actualizan según llegan nuevos datos, pero también podemos visualizar datos históricos desplazando los mismos en la gráfica.

Debajo de estas, se disponen los gráficos provenientes de AEMET, los cuales son actualizados una vez cada hora, al ejecutarse la API a través de Node Red.



39 Cuadro de mando desarrollado en Node Red

Además de esto, el sistema es capaz de avisar al usuario a través de un email en el caso de que se alcance una temperatura menor o igual a 0°C. La temperatura es uno de los parámetros críticos del riego, ya que puede afectar negativamente tanto al sistema de bombeo como a los propios árboles. Dada esta criticidad, se ha decidido crear este sistema de alerta para poder actuar en caso de que se alcance este umbral de temperatura.

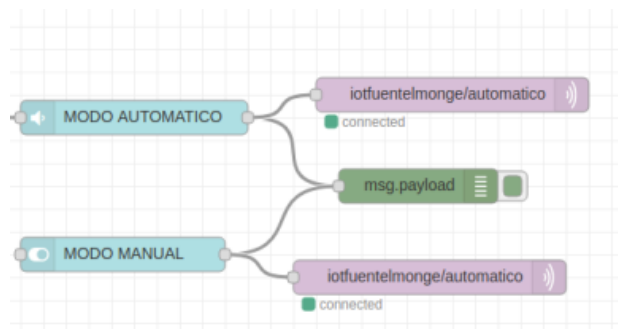
4.5. Actuación sobre el sistema de forma remota

La monitorización de datos es sumamente importante, pero queda incompleta si no podemos reaccionar lo antes posible ante una anomalía o simplemente para cambiar el comportamiento del sistema. Para ello, en el cuadro de mando se han incluido una serie de selectores que nos permiten cambiar el comportamiento de nuestro sistema de forma remota.

En primer lugar, tenemos un selector de apagado general. Al accionarlo, hará entrar en modo apagado a nuestro sistema independientemente del selector que tengamos accionado en el sistema de riego. Esto puede ser muy útil en caso de detectar alguna anomalía o en caso de que estimemos que puede haber un riesgo de helada, y así estar seguros de que el sistema permanecerá inactivo. Al desactivar dicho selector, el sistema volverá al modo que tengamos activado in situ.

Contamos con un selector de modo automático. Al activarlo el sistema entrará en modo automático de forma continua hasta que quitemos la selección o activemos un modo manual, remoto o local.

Por último, también contamos con un modo manual remoto. Al activarlo, se activará la bomba. Este modo tiene prioridad sobre el automático. En la siguiente ilustración aparecen los nodos a través de los cuales se envía la información referente a los cambios de modo de funcionamiento remoto.



40 Nodos Node Red para el envío de instrucciones de forma remota

En la parte superior de cada selector, contamos con dos leds, uno para cada modo local/remoto. De este modo, podemos ver los modos que tenemos activados de forma local con los selectores del sistema, así como confirmar que un modo remoto se ha activado realmente. Para ello, al activar un selector remoto enviamos un mensaje vía MQTT a un determinado topic (iotfuentelmonge/automático) para que sea recibido por la Raspberry Pi Zero y comunicado a Arduino.

Una vez que Arduino lo recibe y activa el modo de trabajo indicado, responde con una confirmación que es enviada por MQTT de nuevo hasta nuestra Raspberry Pi 3 que al recibirlo enciende el led correspondiente.



41 Esquema de funcionamiento del envío de instrucciones

Así, al activar por ejemplo el modo automático remoto, mediante el selector correspondiente, se iluminará el led remoto del modo automático. De igual modo, en la parte inferior, podremos observar que el estado actual ha cambiado según la configuración enviada.



42 Cuadro de mando en modo a utomático remoto

La comunicación entre la Raspberry y Arduino para trasladar las instrucciones se realiza mediante códigos numéricos, enviados a través de comunicación serie.

Al activar un selector en el cuadro de mando enviamos un código numérico generado por Node Red vía MQTT el cual se hace llegar hasta Arduino. Para ello Arduino escucha el puerto serie y filtra aquellos mensajes correspondientes a la codificación establecida en la programación. Cada código está relacionado con un modo de funcionamiento, de tal forma que si Arduino recibe un determinado código activará o desactivará el modo de funcionamiento remoto correspondiente.

De igual modo, pero en sentido contrario, se envía la situación de funcionamiento de Arduino hasta el cuadro de mando. Arduino envía vía puerto Serie unos determinados códigos numéricos informado de los estados locales y remotos. Estos códigos son recogidos por el nodo de Node Red y enviados a través de MQTT hasta llegar al cuadro de mando.

4.6. Resultados

Mediante el desarrollo de este sistema IOT conseguimos una monitorización del sistema de riego de modo que podemos conocer el estado de nuestro sistema en todo momento. El sistema de almacenamiento basado en InfluxDB y su posterior visualización en Grafana permiten conocer la tendencia de los datos y revisar datos históricos si fuese necesario. Por otro lado, la información proveniente de AEMET permite conocer los datos meteorológicos para anticiparnos a cambios atmosféricos o gestionar de forma más eficiente el riego. En caso de que un cambio brusco de tiempo nos sorprenda, el propio sistema avisará vía mail si se baja por debajo de un umbral de temperatura y así poder tomar las acciones adecuadas.

Este sistema de monitorización permite al agricultor reducir los desplazamientos a la propia finca, desplazándonos cuando exista alguna anomalía o sea necesario algún ajuste. De igual modo permite controlar el rendimiento del sistema solar y de la bomba, identificando de forma preventiva potenciales anomalías del sistema en función del caudal de agua de riego.

Gracias a las funcionalidades desarrolladas con Node Red podemos controlar el funcionamiento remoto del sistema en base a todos los datos disponibles antes comentados. Esto es de suma importancia dada la poca accesibilidad del sistema, y permitirá un mejor aprovechamiento del agua de riego, así como proteger al propio sistema de bombeo.

En la siguiente tabla aparece el coste de los elementos utilizados:

Tabla 15 Listado componentes sistema IOT

Componente	Unidades	Coste unitario	Coste total
Raspberry Pi Zero	1	12 €	12,00 €
Raspberry Pi 3	1	35 €	35,00 €
Router Huawei	1	25 €	25,00 €

72 €

En el mercado existen soluciones estándar similares a la desarrollada. Por ejemplo, Gardena cuenta con un Smart Gateway que permite la conexión de diferentes sensores y válvulas de riego para ser controladas a través de su propia APP.



43 Gateway Gardena¹⁸

El coste de este es de en torno a 230€, es decir, tres veces más que nuestro sistema. Además, con el sistema desarrollado no solo actuamos, sino que registramos y visualizamos los parámetros críticos de nuestro sistema. Por otro lado, la arquitectura utilizada nos permite integrar todo tipo de dispositivos o servicios de internet dentro del sistema, o ampliarlo según las necesidades tanto en cuanto a la funcionalidad del propio sistema IOT con en dispositivos conectados.

¹⁸ Fuente de la imagen: <https://www.gardena.com/nl/producten/bewateren/besproeiingscomputers/smart-irrigation-control/967669901/>

5. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Mediante la ejecución de este proyecto se han cubierto todas las expectativas y objetivos planteados inicialmente.

En primer lugar, la extracción de agua del pozo se realiza de forma totalmente autónoma. El sistema desarrollado es capaz de conocer la información sobre el agua existente en el pozo, junto a la temperatura y las horas de sol pico, y extraer el volumen de agua adecuado para no dañar la bomba. Gracias a este proyecto hemos conseguido aumentar de forma muy importante el caudal de agua extraído del pozo y así ahorrar gran parte del caudal de agua de red necesaria. Además, permite la interacción in situ con el usuario gracias a los selectores existentes y a la pantalla LCD que indica la situación del sistema en todo momento. El coste de este sistema tiene una rápida recuperación desde el punto de vista financiero además de ser alimentado totalmente con energía solar. Todo el sistema ha sido desarrollado con herramientas de código abierto tal y como se planteó en los objetivos.

En cuanto al riego, se ha conseguido implementar un sistema de control que gestiona un sistema de riego por goteo para el conjunto de árboles. El sistema permite tanto un funcionamiento totalmente autónomo como un riego manual en función de las necesidades del usuario. Todo el sistema es alimentado por energía solar y se ha desarrollado mediante herramientas de código abierto. Este sistema ha conseguido estabilizar el caudal de riego en todos los árboles permitiendo un riego estable a lo largo de la finca. Además, ha demostrado funcionar de una forma robusta, similar a los productos existentes en el mercado, pero por una fracción de su coste.

Finalmente, contamos con un sistema IOT que nos permite no solo recibir datos de las condiciones ambientales y de riego, sino que nos permite controlar de forma remota algunas de las variables de nuestro sistema de riego. Gracias a los datos disponibles podemos conocer en todo momento la situación de esta finca, tanto desde el punto de vista meteorológico como del riego de los árboles. Además, estos datos pueden ser utilizados para una gestión preventiva desde el punto de vista del mantenimiento de la instalación. El control remoto del sistema hace que podamos ser mucho más reactivos ante cualquier anomalía atmosférica, mejorando el riego de los árboles en base a los datos recopilados. Además, en caso de que no hagamos un seguimiento detallado de los datos el propio sistema es capaz de avisar al usuario en caso de que se presente alguna situación excepcional. De forma similar al caso anterior, conseguimos desarrollar un sistema robusto, con funcionalidades similares a los productos del mercado, pero por una parte del coste de estos.

Por tanto, podemos concluir que los principales objetivos planteados al inicio del proyecto han sido realizados mejorando de forma notable la gestión de los caudales de riego de esta explotación agrícola.

Sin embargo, existen una serie de puntos que pueden ser estudiados para su implementación en el futuro.

En primer lugar, el conjunto de dispositivos existentes puede ser ampliado, añadiendo más equipos distribuidos por la finca de modo que podamos conocer datos de diferentes puntos de esta y así poder contar con unos datos más precisos, como por ejemplo la temperatura ambiente en otros puntos o la humedad del suelo.

En segundo lugar, el sistema actual utiliza un router WIFI 3G haciendo uso de una tarjeta SIM. Se puede explorar la posibilidad de utilizar redes LORA o SIGFOX analizando tanto el coste como el desempeño de estas para nuestro sistema.

Por otro lado, el control remoto solo es posible realizarlo desde la Raspberry Pi situada en el domicilio. Sin embargo, existen APP que permitirían tanto recibir datos como enviar vía MQTT a los topics utilizados. De este modo podríamos disponer de los datos en el móvil o actuar sobre el sistema de forma remota a través del móvil.

Finalmente, como se comentaba anteriormente, en este sistema no se ha utilizado ningún tipo de seguridad en el protocolo MQTT para reducir el consumo de datos y el procesamiento de los mensajes. En el futuro, se debe explorar la posibilidad de cifrar dichos mensajes y analizar la repercusión que esto tendría tanto en la propia Raspberry Pi como en el consumo de datos.

6. Bibliografía

Dow, C. (30 de Octubre de 2018). *Internet of Things Programming Projects: build modern IOT solutions with the Raspberry Pi3 and Python*.

Maneesh, R. (26 de Abril de 2018). *Internet of Things with Raspberry Pi 3: Leverage the power of Raspberry Pi 3 and JavaScript to build exciting IOT projects*.

Waher, P. (28 de Marzo de 2018). *Mastering Internet of Things: design and create your own IOT applications using Raspberry Pi 3*.

Seneviratne, P. (7 de Febrero de 2017). *Building Arduino PLCs: The essential techniques you need to develop Arduino based PLCs*.

Boxall, J. (Septiembre de 2013). *Arduino Workshop: A Hands-On Introduction with 65 Projects*.

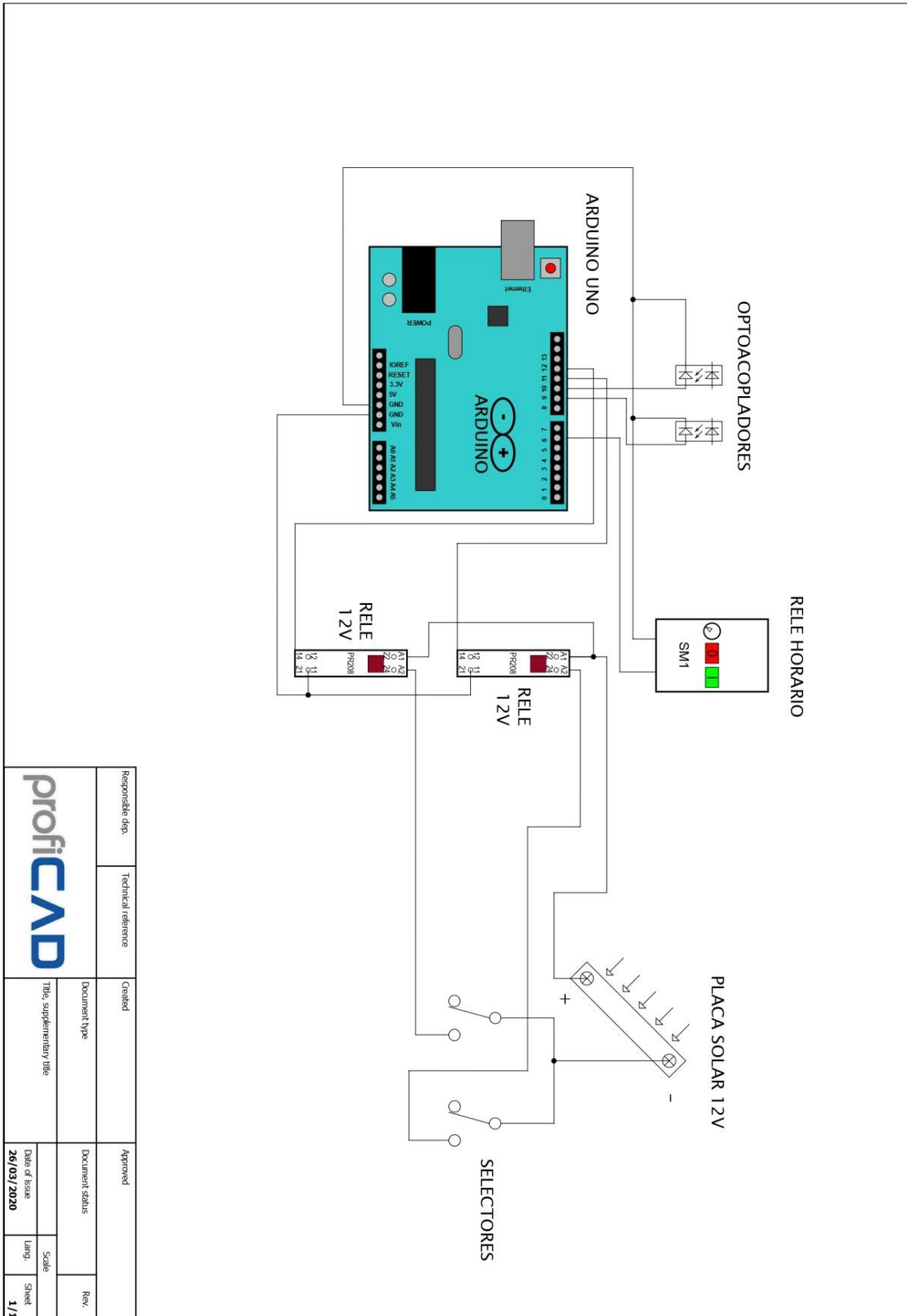
Evans, D. (Abril 2011). *Internet of Things La próxima evolución de Internet lo está cambiando todo*. Obtenido de: https://www.cisco.com/c/dam/global/es_es/assets/executives/pdf/Internet_of_Things_IoT_IBSG_0411FINAL.pdf

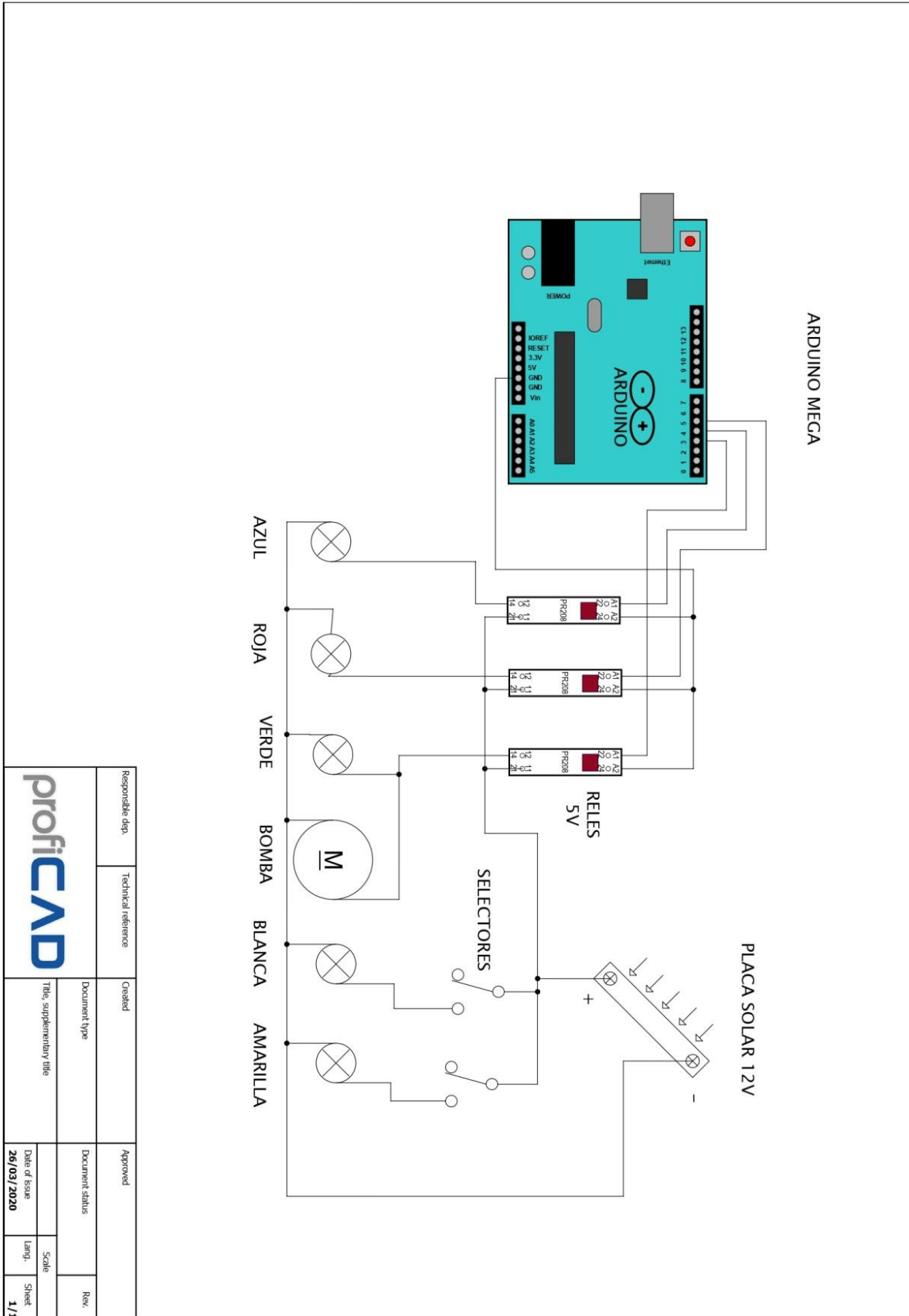
Kocher, C. (Noviembre 2014). *The Internet of Things: Challenges and Opportunities*. Obtenido de: <https://sandhill.com/article/the-internet-of-things-challenges-and-opportunities/>


Suzuki, R. (Julio 2017) *How farmers use the IoT to stop disease*. Obtenido de: <https://blog.bosch-si.com/agriculture/how-farmers-use-iot-to-stop-disease/>

Miron Alexe, V. (Diciembre 2017). *IoT power consumption monitoring system for offgrid households*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/322087251_IoT_Power_Consumption_Monitoring_System_For_Off-Grid_Households

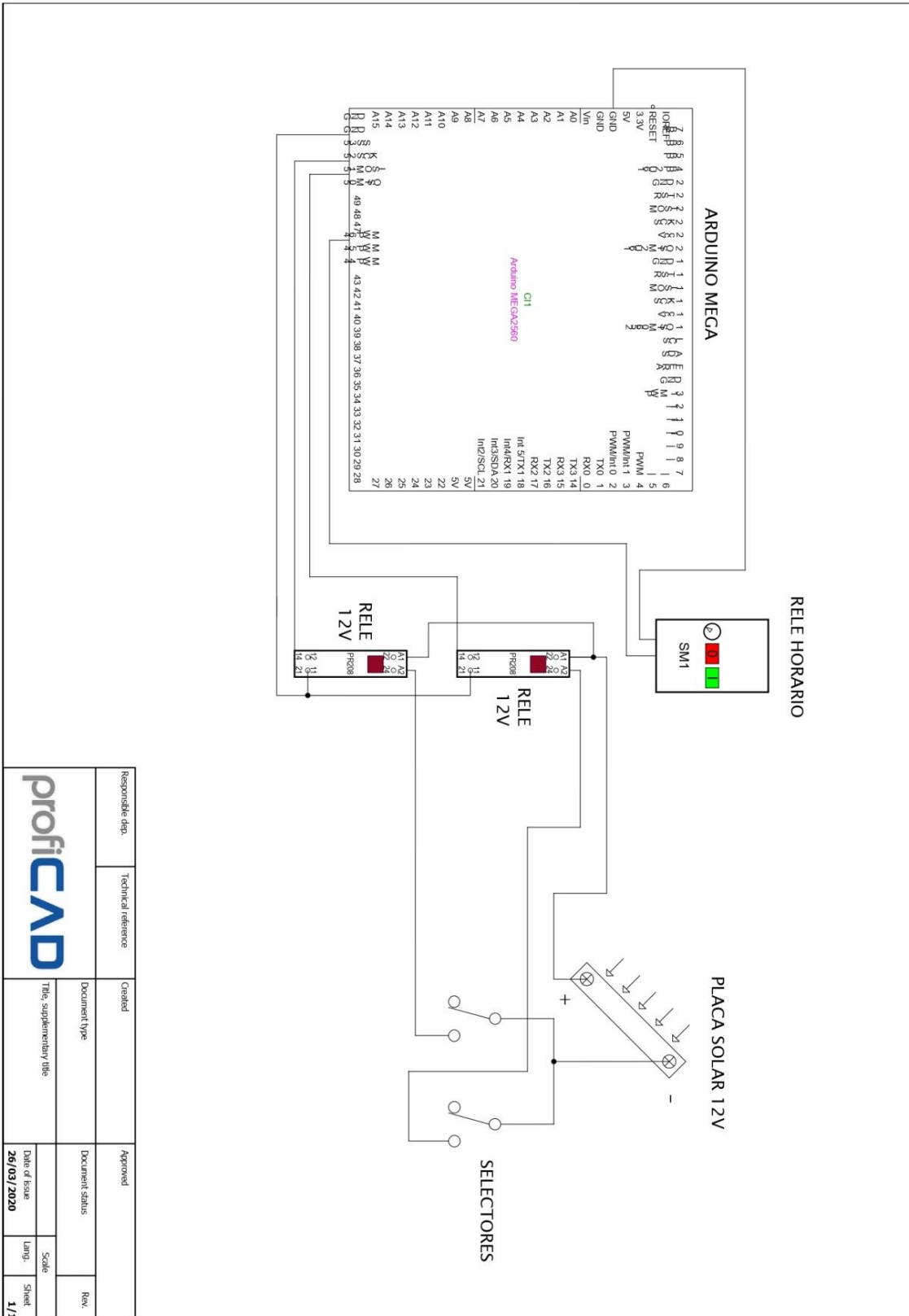
Anexo 1. Esquemas eléctricos sistema de extracción de agua

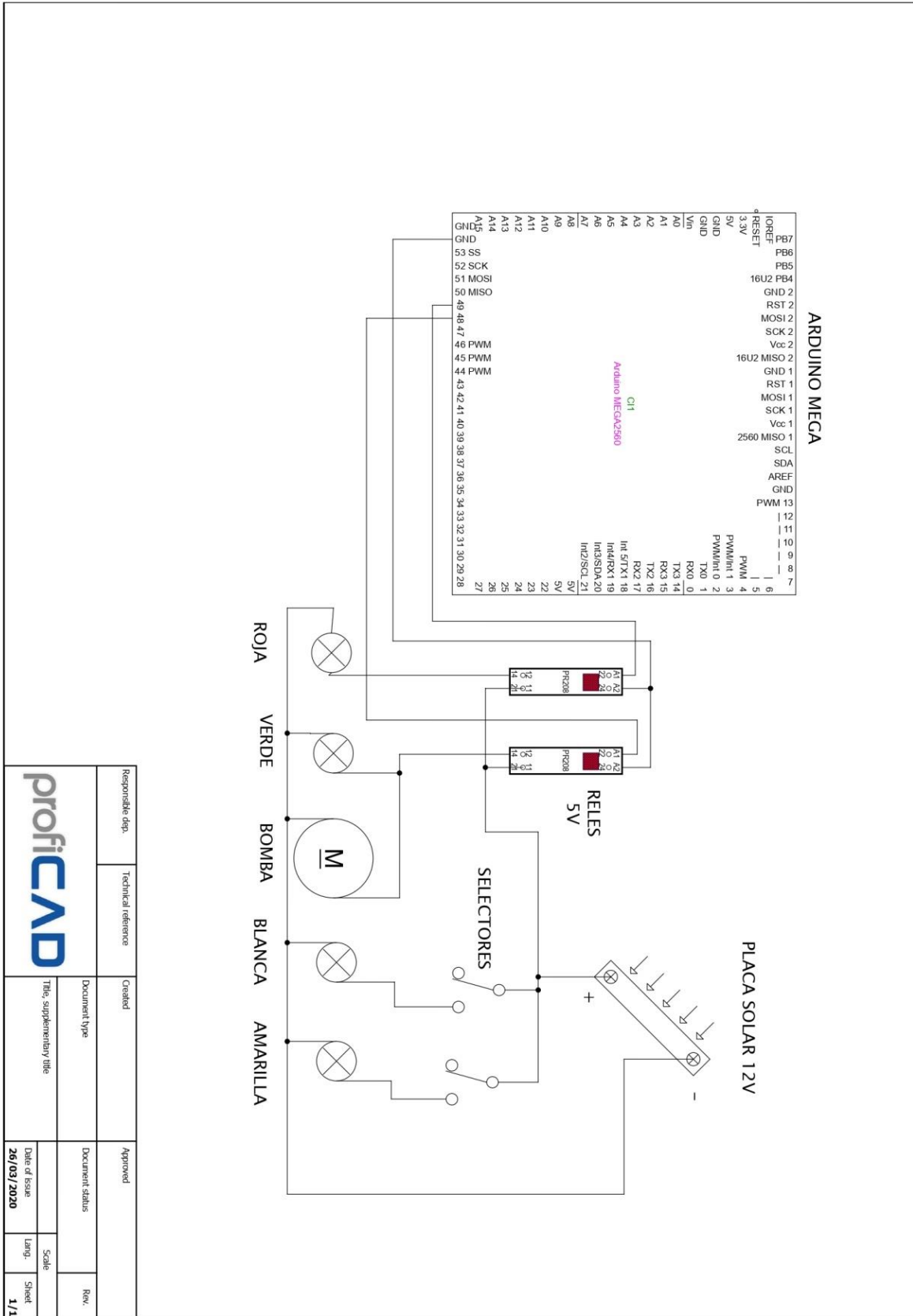





Responsible dep.	Technical reference	Created	Approved
		Document type	Document status
		Title, supplementary title	Rev.
Date of issue	Scale	Sheet	
26/03/2020		1/1	

Anexo 2. Esquemas electricos sistema de riego





Responsible dep.	Technical reference	Created	Approved
		Document type	Document status
Title, supplementary title		Date of issue	Scale
		26/03/2020	Sheet
			1/1