

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural



DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS AUTÓNOMO BASADO EN ARDUINO PARA SU UTILIZACIÓN EN CAMPO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

Alumno: D. Iván de la Flor Blanco

Tutor: Prof. Dr. Pablo González Altozano

Cotutor: Prof. Dra. María Gasque Albalate

Curso Académico: 2018-2019

VALENCIA, septiembre de 2019

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS AUTÓNOMO BASADO EN ARDUINO PARA SU UTILIZACIÓN EN CAMPO

RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolla un sistema para la adquisición y almacenamiento de datos autónomo (datalogger) que permite la adquisición de la señal y la monitorización de sensores de forma continua instalados en el campo. Para garantizar la autonomía del mismo se ha diseñado e incorporado un sistema de alimentación propio basado en la energía solar. El equipo permite adquirir la señal de numerosos sensores de precisión y almacena los datos adquiridos tanto en una tarjeta microSD como en internet de las cosas (IoT) haciendo posible la consulta y la monitorización de los mismos a distancia, a través de internet. El diseño del sistema se ha basado en un microcontrolador de tipo Arduino al que se le han incorporado diversos módulos, como un módulo SD para el almacenamiento de los datos en una tarjeta SD, el módulo o “shield” GSM/GPRS para el envío de datos a internet, y otros hechos ‘ad hoc’ para esta aplicación (sistema de alimentación del sensor, acondicionamiento de la señal, etc.). Además del diseño del sistema, se describe la implementación del mismo y la fabricación de un prototipo funcional, que se ha comprobado con su utilización para la monitorización de las variaciones del diámetro del tronco de un cerezo en campo con un dendrómetro basado en L.V.D.T. previamente calibrado.

Palabras clave: Sistema de adquisición de datos, datalogger, sensor, módulo GSM/GPRS.

Alumno: D. Iván de la Flor Blanco

VALENCIA, septiembre 2019

Tutor: Prof. Dr. Pablo González Altozano

Cotutor: Prof. Dra. María Gasque Albalate

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS DATA ACQUISITION SYSTEM BASED ON ARDUINO FOR USE IN THE FIELD

SUMMARY

In the present project a system for the acquisition and storage of data (datalogger) is developed. It allows the continuous monitoring of the connected sensors installed in the field. To guarantee its autonomy, a self-powered system based on solar energy has been designed and incorporated. The equipment allows the acquisition of the signal from numerous precision sensors and stores the acquired data both in a microSD card and in the Internet of Things (IoT) making it possible to consult and monitor them remotely, through Internet. The design of the system has been based on an Arduino-type microcontroller with several modules, such as an SD module for storing the data on an SD card, the GSM / GPRS module or 'shield' for sending the data through internet, and other ones made 'ad hoc' for this application (sensor feeding system, signal conditioning, etc.). In addition to the design of the system, it also has been implemented a functional prototype. It also has been tested by using it for the monitoring of the variations of the trunk diameter of a cherry tree with a dendrometer based on L.V.D.T. previously calibrated.

Keywords: Data acquisition system, datalogger, sensor, Shield GSM/GPRS

Student: Mr. Iván de la Flor Blanco

VALENCIA, September 2019

Tutor: Dr. Pablo González Altozano

Cotutor: Dr. María Gasque Albalate

DISSENY I DESENVOLUPAMENT D'UN SISTEMA D'ADQUISICIÓ DE DADES AUTÒNOM BASAT EN ARDUINO PER A LA SEUA UTILITZACIÓ EN CAMP

RESUM

En el present projecte es desenvolupa un sistema per a l'adquisició i emmagatzematge de dades (datalogger) autònom que permeta el monitoratge de sensors de forma contínua instal·lats en el camp. Per a garantir l'autonomia del mateix s'ha dissenyat i incorporat un sistema d'alimentació propi basat en l'energia solar. L'equip permet adquirir el senyal de nombrosos sensors de precisió i emmagatzema les dades adquirides tant en una targeta microSD com en internet de les coses (IoT) fent possible la consulta i el monitoratge dels mateixos a distància, a través d'internet. El disseny del sistema s'ha basat en un microcontrolador de tipus Arduino al qual se li han incorporat diversos mòduls, com un mòdul SD per a l'emmagatzematge de les dades en una targeta SD, el mòdul o 'shield' GSM/GPRS per a l'enviament de dades a internet, i altres fets 'ad hoc' per a aquesta aplicació (sistema d'alimentació del sensor, condicionament del senyal, etc.). A més del disseny del sistema, es descriu la implementació del mateix i la fabricació d'un prototip funcional, que s'ha comprovat amb la seua utilització per al monitoratge de les variacions del diàmetre del tronc d'un arbre cirerer amb un dendròmetre basat en L.V.D.T. prèviament calibrat.

Paraules clau: Sistema d'adquisició de dades, datalogger, sensor, mòdul GSM/GPRS.

Alumne: D. Iván de la Flor Blanco

VALÈNCIA, setembre 2019

Tutor: Prof. Dr. Pablo González Altozano

Cotutor: Prof. Dra. María Gasque Albalade

AGRADECIMIENTOS

Después de un intenso período de un año desde que comencé este trabajo indagando en el mundo Arduino, hoy es el día: escribo este apartado de agradecimientos para finalizar mi trabajo de fin de máster. Ha sido un período de aprendizaje intenso, no solo en el campo científico, sino también a nivel personal. Es por ello que me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado durante este tiempo su ayuda y apoyo.

Primero de todo, me gustaría agradecer al departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la escuela el haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, así como el buen trato que he recibido de su parte, todos los conocimientos que me han transmitido y la ayuda que me han brindado, siempre estando dispuestos a colaborar. En especial quisiera agradecerle a mi tutor Pablo las orientaciones, sugerencias y estímulos que me ha dado y me han conducido durante estos meses con un talante abierto y generoso.

También me gustaría agradecer a mi familia sus sabios consejos y su comprensión, gracias a quienes soy quien soy y hacia quienes sólo puedo expresar mi más sincero agradecimiento por apoyarme durante la etapa académica que hoy culmina.

A mis amigos y amigas, que no solo habéis estado ahí para apoyarnos entre nosotros en los momentos difíciles, además también me habéis distraído de los estudios en los momentos necesarios, me habéis animado y enseñado a ser mejor persona.

Finalmente, a todas las personas que no he citado expresamente pero que me han ayudado a realizar este trabajo.

ÍNDICE

| | |
|---|--------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1.SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS(DAQ)..... | 1 |
| 1.2.PLATAFORMAS TIPO ARDUINO | 3 |
| 2. ANTECEDENTES, SISTEMAS DAQ..... | 5 |
| 3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO | 6 |
| 4. OBJETIVOS..... | 8 |
| 5. SOLUCIÓN PROPUESTA | 9 |
| 6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA..... | 11 |
| 6.1.ARQUITECTURA DEL SISTEMA HARDWARE | 11 |
| 6.1.1. Componentes equipo de monitorización sistema DAQ..... | 11 |
| 6.1.2. Componentes complementarios, implementación y puesta a prueba..... | 13 |
| 6.1.3. Esquemas de conexiones y eléctricos | 14 |
| 6.2.SOFTWARE DEL SISTEMA | 15 |
| 7. PRESUPUESTO | 16 |
| 8. IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA A PRUEBA DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA..... | 18 |
| 8.1.IMPLEMENTACIÓN | 18 |
| 8.2.PUESTA A PRUEBA DEL PROTOTIPO | 22 |
| 8.3.RESULTADOS DE LA PUESTA A PRUEBA..... | 27 |
| 8.3.1. Fallos y problemas detectados durante el periodo de prueba del equipo. | 27 |
| 8.3.2. Información resultante de la puesta a prueba..... | 28 |
| 8.3.2.1. <i>Datos leídos y almacenados del dendrómetro y estado del prototipo</i> | 28 |
| 8.3.2.2. <i>Información del envío de avisos</i> | 30 |
| 8.4.CONCLUSIÓN DE LA PUESTA A PRUEBA | 32 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA..... | 34 |
| ANEJO I: COMPONENTES DEL SISTEMA HARDWARE | |
| ANEJO II: ESQUEMAS DEL SISTEMA HARDWARE | |
| ANEJO III: SOFTWARE DEL SISTEMA..... | |
| ANEJO IV: CÓDIGO SOFTWARE..... | |
| ANEJO V: IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA A PRUEBA..... | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1. Partes que componen un DAQ..... | 1 |
| Figura 2. Placa microcontrolador Keyestudio Mega 2560 R3. | 12 |
| Figura 3. Sensor de desplazamiento lineal L.V.D.T., Solartron Metrology, modelo DFg \pm 2,5mm. | 13 |
| Figura 4. Soportes diseñados, fabricados e instalados en las cajas de los equipos y en el módulo solar..... | 19 |
| <i>Figura 5. Representación de los resultados obtenidos de la calibración del dendrómetro.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 6. Representación de los resultados obtenidos de la calibración antes (valores en azul) y después (valores en verde) de su ajuste.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 7. Situación y emplazamiento de la parcela de ensayo.</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 8. Instalación de equipos y dendrómetro en campo.</i> | <i>26</i> |
| Figura 9. Datos almacenados en Thingspeak, monitorización del dendrómetro. | 29 |
| Figura 10. Datos almacenados en Thingspeak, voltaje batería del prototipo..... | 30 |
| Figura 11. Mensajes de aviso recibidos en testeo por alta temperatura interna..... | 31 |
| Figura 12. Mensajes de aviso recibidos durante el periodo de prueba por nivel de carga de la batería del prototipo bajo..... | 32 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Componentes del sistema de alimentación del equipo de monitorización. | 12 |
| Tabla 2. Componentes adquisición y almacenamiento de datos del equipo de monitorización. | 13 |
| Tabla 3. Presupuesto componentes solución propuesta | 17 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS(DAQ)

Al igual que los seres humanos obtienen información del ambiente que los rodea a través de sus sentidos, los sistemas electrónicos adquieren información del medio mediante los sistemas de adquisición de datos (DAQ). A su vez, esta información adquirida en los sistemas electrónicos puede ser empleada por los seres humanos para distintos fines.

Hoy en día están presentes en todas las actividades del ser humano, en los sistemas para el control industrial de procesos, automóviles, aviones, aparatos médicos, aparatos electrodomésticos, etc. y se han convertido en una parte esencial del bienestar de nuestras vidas (REVERTER y PALLAS-ARENY, 2005). En el caso de la agricultura, la situación no es diferente, siendo diversas y cada vez más frecuentes las aplicaciones y utilización de los sensores en ella. Entre ellas se encuentran, por ejemplo, la automatización del riego por goteo, basado en la información proporcionada por sensores de humedad del suelo (VENTURA *et al.*, 2010); DURSUN Y OZDEN, 2011); realizar monitoreo a invernaderos en tiempo real para controlar la luminosidad, el calor, ventilación, riego, etcétera (KASAEI *et al.*, 2011); medición de la radiación solar (RIGHINI *et al.*, 2010), etc. (ABDULLAH y BARNAWI, 2012) mencionan que las redes de sensores están entre las 10 tecnologías emergentes que cambiarán el mundo para bien.

Con todo ello se tiene que la adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con un PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Para llevar a cabo dicho proceso, se emplean los sistemas DAQ. Un sistema DAQ está formado por sensores, hardware de medidas DAQ y un PC con software programable, véase Figura 1. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de los PCs estándares en la industria, proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable (NI, 2019).



Figura 1. Partes que componen un DAQ. Fuente: NI, 2019.

Analizando cada una de las partes de los sistemas DAQ se tiene (NI, 2019):

- Sensores.

Los sensores, también conocidos como “transductores” tienen por finalidad medir una magnitud física cualquiera, por ejemplo, temperatura, y convertir esa lectura en una señal eléctrica factible de ser medida y comunicada de algún modo.



- Dispositivo DAQ.

Este elemento es el que permite la interacción entre los sensores y el computador del usuario, por lo que su función principal es digitalizar las señales que le son comunicadas desde los sensores con objeto de que puedan ser interpretadas por el PC. Incorporan un circuito que les permite adecuar las señales a algún protocolo de comunicación. Con el mismo propósito incluyen también un convertidor que permite transformar las señales analógicas en señales digitales, y finalmente un bus de comunicación a PC, que corresponde al canal que el dispositivo utilizará para comunicarse con el PC, el cual puede ser a través de Ethernet, WI-FI, ModBus u otro canal de comunicación. Algunos de estos dispositivos incluyen un visor que nos permite conocer la medición que le entrega el sensor, en cambio otros son ciegos, es decir, no tienen visor, siendo solo factible visualizar las mediciones desde el computador al cual hemos conectado el dispositivo DAQ.

Entre los dispositivos de este tipo se encuentran los llamados registradores de proceso o dataloggers que normalmente están basados en microcontroladores. Estos cuentan con memoria interna, que les otorga autonomía de almacenamiento, puesto que son capaces de almacenar los datos recabados en su memoria interna. Por ello se pueden emplear como sistema de adquisición de datos. Esta funcionalidad es especialmente útil porque en caso de pérdida de comunicación con el PC, su memoria interna permite actuar como un Backup de las mediciones sin perder la información de los datos recolectados. Por tanto, la ventaja principal de los dataloggers es que pueden operar de forma independiente a un ordenador, a diferencia de muchos otros tipos de dispositivos de adquisición de datos, motivo por el cual suelen ser empleados en los sistemas DAQ.

Los dataloggers están disponibles en diversas formas y tamaños. El rango disponible incluye, desde registradores económicos de función fija de un solo canal, hasta dispositivos programables más poderosos capaces de manejar cientos de entradas. Cabe destacar que en el presente trabajo se desarrolla de un dispositivo de este tipo que dispone de gran cantidad de posibilidades de uso en el sector agrario.

- PC con software de Supervisión.

Finalmente tenemos el PC con el software, cuya función es efectuar la interacción con el usuario del sistema. Mediante este elemento podemos visualizar y almacenar los datos en diferentes formas, procesarlos y hacer determinados cálculos. A su vez podemos interactuar con el dispositivo DAQ y controlar de manera más directa todo el sistema.

Por otra parte, el uso de estos sistemas se ha masificado ampliamente en sectores como el industrial y el minero, entre otras cosas porque nos ofrece importantes ventajas. Entre ellas facilitan el trabajo de análisis y acceso a la información, particularmente cuando se trata de grandes volúmenes de datos. También posibilitan un mayor nivel de seguridad sobre los datos, que pueden ser respaldados en uno o más dispositivos y luego ser consultados rápidamente. Por otro lado, otorgan una mayor facilidad de control y monitoreo ya que podemos operar con varios sensores ubicados físicamente en lugares distintos. Por último, permiten un importante ahorro en los costos, además cada uno de los componentes antes señalados puede ser renovado en forma independiente.



1.2. PLATAFORMAS TIPO ARDUINO

Las plataformas tipo Arduino son todas aquellas plataformas basadas en la réplica tanto del hardware como del software de la plataforma Arduino, que fue la primera plataforma creada de este tipo.

Arduino surgió en 2003, con el fin de facilitar el acceso y uso de la electrónica y programación a los estudiantes de electrónica. Arduino es una plataforma electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar por los creadores y desarrolladores. Esta se desarrolla en torno a un microcontrolador ATMEL (ARDUINOCC, 2019).

Las placas Arduino cuentan con todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de su microcontrolador siendo capaces de leer entradas tanto analógicas como digitales (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlas en una salida: activar un motor, encender un LED y publicar algo en línea. Además, es posible programar el microcontrolador de la tarjeta de forma sencilla mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring, lenguaje C++ simplificado) y el software Arduino (IDE) tanto en Windows como macOS y GNU/Linux (ARDUINOCC, 2019).

Entre las características de esta plataforma se encuentra que es (ARDUINOCC, 2019):

- Barata: Son relativamente económicas en comparación con otras plataformas de microcontroladores.
- Multiplataforma - El software de Arduino (IDE) se ejecuta en Windows, Macintosh OS X, y Linux. La mayoría de los sistemas de microcontroladores están limitados a Windows.
- Entorno de programación simple y claro: el software Arduino (IDE) es fácil de usar para los principiantes, pero es lo suficientemente flexible como para que los usuarios avanzados también lo aprovechen.
- Software de código abierto y extensible: el software Arduino se publica como herramientas de código abierto, disponibles para la extensión por programadores experimentados. El lenguaje se puede expandir a través de las bibliotecas de C++, y las personas que deseen comprender los detalles técnicos pueden dar el salto de Arduino al lenguaje de programación AVR C en el que se basa. De manera similar, puede agregar código AVR-C directamente a sus programas Arduino si se desea.
- Fuente abierta y hardware extensible: los planos de los tableros Arduino se publican bajo una licencia de Creative Commons, por lo que se pueden crear réplicas del módulo, ampliarlo y mejorarlo.

Debido a sus características es posible utilizar en esta plataforma adaptadores denominados "shields" o "módulos" que permiten incorporar periféricos complejos capaces de ampliar las capacidades y funciones de la placa. Adicionalmente, todas estas características han hecho de la plataforma Arduino una de las más empleadas, generándose, alrededor de ella y gracias a su alcance, una gran comunidad de trabajo con mentalidad "Open Source" en la que se comparte toda la información y trabajos realizados con esta plataforma. Como resultado, existe una cantidad de documentación bastante extensa y accesible sobre multitud de usos de la plataforma.



El hecho de que sea una plataforma de software y hardware abiertos y extensibles ha producido que se generen gran cantidad de placas electrónicas no oficiales para distintos propósitos, así como librerías de software de terceros. Ello ha producido lo que en este trabajo se ha denominado plataformas tipo Arduino. Todas estas plataformas son replicas legales tanto del hardware como del software, que aun pudiendo tener diferencias con la plataforma oficial, mantienen todas sus funcionalidades e incluso las amplían pudiendo ser incluso más económicas que la oficial.

Por todo ello las plataformas de este tipo son usadas para infinidad de proyectos ya que permiten crear objetos que interactúen con interruptores, sensores, luces, motores y otros dispositivos para obtener información diversa. Éstos a su vez pueden funcionar comunicándose con un programa o ser totalmente autónomos, lo que amplía enormemente su rango de aplicaciones.

Como gran inconveniente, las plataformas tipo Arduino tienen una capacidad o potencia limitadas.

Así pues, se puede considerar que Arduino no destaca por su potencia, sino por su versatilidad.



2. ANTECEDENTES, SISTEMAS DAQ

Actualmente, muchos fabricantes ofrecen diversas opciones de sistemas DAQ. De forma general se diferencian unos de otros en los protocolos de comunicación y su conexión con el PC, en los softwares que requieren para su configuración y manejo, sobre todo en la cantidad de puertos o canales de conexión, en la cantidad de muestras o capturas que pueden tomar por segundo y en la resolución en sus convertidores analógicos digitales. Teniendo en cuenta esto, todos parten de una base más o menos común, aunque existen excepciones.

En primer lugar, la mayoría de los sistemas están diseñados para su empleo en industria. Ello conlleva que su diseño esté preparado para un entorno de instalación en principio favorable, en el que el riesgo de daños es normalmente menor al de una instalación en campo a la intemperie, situación para la que no suelen estar preparados salvo casos específicos.

En segundo lugar, su sistema de alimentación está diseñado para llevarse a cabo mediante su conexión a la red eléctrica, lo que hace que esta sea fiable y fácil de llevar a cabo para el DAQ a la vez que le hace dependiente de dicha conexión.

En tercer lugar, las conexiones del DAQ con el PC suelen ser mediante cables, lo que las hace fáciles de llevar a cabo, seguras y rápidas. Este tipo de conexiones permiten cada vez más la transmisión de gran cantidad de datos a gran velocidad de forma segura, permitiendo adquirir señales de gran potencia y rendimiento. En cambio, hacen depender la visualización de los datos de la conexión por cable del sistema con el PC, siendo para ello necesarias distancias relativamente cortas.

En cuarto lugar, se busca un alto rendimiento. Los últimos modelos han sido diseñados para llevar a cabo la adquisición de datos de medición, procesamiento de datos posterior y transmisión a un controlador de nivel superior, a velocidades muy altas, por ejemplo, tasas de muestreo de hasta 19.2 kHz, para todos los canales. Paralelo a esto, se busca la adquisición de datos con una precisión muy alta, de una clase de precisión 0.05%, que también se garantiza a través de amplificadores de medición con una alta resolución, de bits 24.

En quinto lugar, los sistemas DAQ carecen de la flexibilidad y versatilidad necesarias, a pesar de que se está mejorando este aspecto. Normalmente estos sistemas son cerrados, por lo que solo son capaces de realizar la adquisición de datos de ciertos sensores específicos, que a su vez suelen ser proporcionados por la misma empresa. Además, el número de sensores que son capaces de monitorizar suele ser bajo, y aunque este problema se soluciona mediante la adición de tarjetas compatibles, el aumento del coste del sistema final suele ser importante.

En sexto lugar, cada vez se busca más proporcionar acceso a todos los parámetros del dispositivo para configuración, operación y análisis, a través de cualquier dispositivo terminal compatible con Internet, lo que significa que los usuarios pueden implementar aplicaciones en dispositivos móviles y soluciones en la nube. Como inconveniente decir que este tipo de soluciones están sujetas a conexiones de los sistemas a la red de internet mediante cableado, tan solo en casos específicos son capaces de conectarse a internet de forma inalámbrica.

Por último, la mayoría de los DAQ tienen precios realmente elevados, y en los casos que no es así sus capacidades son mínimas.



3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

En el sector agrario, los sistemas de adquisición de datos han de ser capaces de satisfacer ciertas necesidades especiales en la mayoría de casos.

Puesto que en este sector los sistemas DAQ normalmente van a ser instalados en campo, es necesario que estos sean capaces de resistir las condiciones ambientales adversas en las que se van a encontrar. Además, por este mismo hecho, normalmente no se va a disponer de la red eléctrica para su alimentación, por lo que han de tener una fuente de energía de alimentación alternativa a esta. Otro hándicap derivado de su lugar de instalación es la imposibilidad de conexión a distancia del dispositivo DAQ con el PC mediante cable puesto que el PC se encuentra normalmente en un lugar de trabajo alejado del sistema de adquisición de señales. Esto hace necesario un sistema de consulta de los datos a distancia, puesto que, si no, será necesario desplazarse hasta campo cada vez que se deseen consultar los datos recabados.

Por otro lado, los DAQ agrarios necesitan ser versátiles, puesto que en este sector se usan gran variedad de transductores con diferentes funciones y características de funcionamiento.

Además, han de ser sistemas abiertos, capaces de leer sensores de múltiples fabricantes, puesto que en muchas ocasiones los sensores agronómicos son muy específicos, por lo que son ofrecidos por unas pocas empresas.

Por último, no necesitan de tanta potencia como los sensores empleados dentro de la industria puesto que sus tasas o frecuencias de muestreo no son tan elevadas.

Como se ha visto en el apartado anterior de forma general los sistemas de adquisición de datos no suelen estar preparados para soportar las condiciones adversas del campo, dependen de la red eléctrica para su alimentación y no son capaces de realizar conexiones con los ordenadores a distancia. En cambio, de forma particular existen productos en el mercado que reúnen algunas de estas características siendo resistentes y que cuentan con sistemas de alimentación basados en baterías y con sistemas de almacenamiento de la información. Si bien es cierto que estos sistemas no dejan de ser dependientes puesto que suelen necesitar del desplazamiento de alguien al lugar donde se encuentran instalados para cambiar sus baterías, así como para obtener la información almacenada en ellos. También hay sistemas capaces de enviar la información a distancia, pero suelen tener precios muy elevados, y suelen estar bastante limitados, puesto que suelen ser sistemas cerrados de poca potencia y versatilidad.

Uno de los mayores problemas de los DAQ comerciales existentes es su poca versatilidad. Al tratarse de sistemas cerrados que solo permiten el uso de los sensores de su propio fabricante estos no se pueden emplear cuando se quieren utilizar gran variedad de sensores, lo que conlleva varios problemas.

Por un lado, en caso de que la propia marca del DAQ disponga del sensor que se necesita, se genera el problema de que no se puedan usar otros sensores que quizás se adapten mejor a ciertos casos particulares, impidiendo el uso de mejores soluciones.

Por otro lado, en el sector agrario es fácil que el fabricante del DAQ no disponga del sensor que se necesita, pero otra empresa sí, debido a que estos son muy específicos, por lo que unos son ofrecidos por unas pocas empresas y otros por otras. Esto unido a que los sistemas DAQ son cerrados, puede significar que con un DAQ no puedas medir ciertas variables y con otros sí y



viceversa, con lo que en muchos casos serían necesarios varios DAQ en el caso de que se vayan a medir diversas variables.

Por tanto, en el sector agrario son necesarios sistemas de adquisición de datos resistentes, autónomos, versátiles, abiertos y a poder ser conectados a distancia con el PC, por ejemplo, a través de internet, y además precisos, robustos y baratos. Puesto que en el mercado no hay sistemas DAQ que reúnan estas características, y si los hay están muy limitados o tan solo tienen algunas de ellas, surge el presente trabajo con el cual se pretende desarrollar un sistema de adquisición de datos con las características necesarias para su uso en el sector agrario.



4. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una solución capaz de ofrecer un sistema de adquisición de datos para su empleo en campo, siendo este: resistente; con lo que soporte las condiciones ambientales adversas; autónomo, pudiendo funcionar y abastecerse de energía por sí solo una vez instalado así como controlar su estado; versátil y abierto, de modo que pueda adaptarse a la monitorización de múltiples sensores; capaz de almacenar la información obtenida, y por último, capaz de ofrecer la posibilidad de consultar y descargar los datos obtenidos a distancia.



5. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para obtener un sistema de adquisición de datos (DAQ) para ser empleado en campo, que cumpla los objetivos marcados, se ha decidido hacer uso de una plataforma de tipo Arduino, en base a la cual se desarrolla este sistema. Se ha decidido basar la solución en este tipo de plataforma debido a que:

- Cuenta con todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de su microcontrolador, siendo capaz de leer entradas tanto analógicas como digitales y convertirlas en una salida, todo ello de forma sencilla y económica.
- Tanto su software como su hardware son libres y extensibles, existiendo gran cantidad de información para su uso, lo que le confiere gran versatilidad, permitiendo con ello que el DAQ desarrollado a partir de él también lo sea. Esta característica permitirá al DAQ resultante monitorizar gran variedad de sensores.
- Es posible añadirle funciones mediante la conexión de módulos. Con estos, esta plataforma es capaz de almacenar gran cantidad de información, pudiendo también enviar los datos a distancia e incluso almacenarlos en la nube.

Es capaz de realizar monitoreo de sensores de forma fiable. (JUNIOR *et al.*, 2012) realizaron una evaluación en la que compara el microcontrolador Arduino en la medición de señales analógicas con las salidas que arroja un ohmímetro (voltímetro) analógico, concluyendo que se puede confiar en éste para la realización de mediciones analógicas. (DI y GERTZ, 2013) muestran la manera de construir diferentes aparatos electrónicos para medir variables atmosféricas utilizando la plataforma Arduino UNO.

Además de la plataforma tipo Arduino y sus módulos se empleará un sistema de alimentación basado en la energía solar, integrando todos los elementos en una caja de protección.

Gracias al sistema de alimentación que permitirá al DAQ abastecerse de energía eléctrica por sí solo, y a los módulos que le permitirán almacenar y enviar la información obtenida, la solución propuesta será autónoma.

Con todo ello, se propone realizar el DAQ con una placa de tipo Arduino, a la que se conectarán diversos módulos. Con estos módulos se llevará a cabo el almacenamiento de la información obtenida en una tarjeta microSD de alta capacidad y en la nube para permitir su consulta a través de internet. Además, al tratarse de un sistema autónomo, se integrarán sensores en el equipo del DAQ con los que él mismo y el usuario controlarán su estado, siendo capaz la placa del microcontrolador de enviar avisos al usuario cuando detecte algún fallo.

Para la alimentación con energía solar se instalará un módulo solar y se integrará en el equipo un regulador de carga y una batería, así como un indicador del nivel de carga y elementos de acondicionamiento de la señal de alimentación.

Todos estos elementos, salvo el módulo solar se instalarán en un equipo estanco que los protegerá de las inclemencias del tiempo. En este además se incluirán los accesorios necesarios para la conexión de los transductores y el módulo solar y para la instalación del mismo en campo.

Tanto los avisos como el almacenamiento de la información recabada por microcontrolador del DAQ se llevarán a cabo mediante el microcontrolador y un módulo GSM/GPRS sim 900.



El almacenamiento de la información en la nube se realizará concretamente en la plataforma Thingspeak. ThingSpeak es una plataforma de Internet of Things (IoT) que permite recoger y almacenar datos de sensores en la nube y desarrollar aplicaciones IoT. Por lo tanto, esta plataforma sirve para la conexión del DAQ con cualquier dispositivo con conexión a internet con el que se desee tener acceso a los datos recabados, PC, Tablet, Smartphone... El acceso a esta plataforma se puede realizar a través de su página web o de diversas Apps, en este caso se ha empleado la App THingViewFull. Thingspeak también ofrece aplicaciones que permiten analizar y visualizar tus datos en MATLAB y actuar sobre los datos, realizar análisis, visualizaciones, gráficas, etc.



6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En el presente apartado se procede a desarrollar el sistema DAQ propuesto como solución. Para ello, primero se detallan los componentes hardware necesarios, indicando su función en el equipo y como se han de montar y conectar. Además, se da un presupuesto simplificado con el coste de todos estos componentes. Posteriormente, se procede a explicar el software empleado, sus características principales y el programa desarrollado.

6.1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA HARDWARE

A continuación, se detallan todos los elementos de hardware utilizados para llevar a cabo la solución propuesta. Además de su enumeración, se indica la función que van a desempeñar en el equipo del sistema. Para tener más información acerca de cada componente, como pueda ser la justificación de su necesidad, motivo de selección o características técnicas consúltese el Anejo I.

Además de los elementos necesarios para llevar a cabo el equipo del sistema DAQ o equipo principal de monitoreo propuesto, también se muestran los elementos utilizados para llevar a cabo su implementación y puesta a prueba. Entre ellos se encuentran el sensor, los componentes necesarios para su alimentación y los necesarios para el acondicionamiento de la señal del mismo al equipo.

6.1.1. Componentes equipo de monitorización sistema DAQ

En primer lugar, se van a mostrar los elementos del equipo de monitorización del sistema DAQ, comenzando por los elementos empleados en su sistema de alimentación y pasando posteriormente a los elementos empleados para la adquisición y almacenamiento de datos

Entre los elementos del sistema de alimentación empleados para el equipo de monitorización se encuentran algunos elementos como el panel solar o el controlador de carga, encargados de llevar a cabo el suministro de la energía eléctrica de alimentación. Por otra parte, se emplean otros elementos como pueden ser fusibles o reguladores de tensión, los cuales se encargan de acondicionar la alimentación del equipo a fin de que esta sea la más adecuada.

En la Tabla 1 se pueden ver todos los componentes del sistema de alimentación junto con la función que desempeñan, para mayor información véase el Anejo I: Componentes del sistema hardware, en el que se explican todas las características y funciones de cada uno de ellos, además de la justificación de su elección.

En cuanto a los componentes empleados para el sistema de adquisición y almacenamiento de datos, se ha empleado una placa de plataforma tipo Arduino para gestionar todas las funciones del equipo, así como para realizar la lectura de los datos de los sensores. Concretamente se ha empleado la placa Keystudio mega 2560 r3, Figura 2 que es una réplica de la placa Arduino mega con sus mismas características y funciones. Además, también se han empleado distintos módulos con el fin de dar a la placa mayores funciones y capacidades, como por ejemplo conectarse a internet o enviar avisos vía SMS. En la Tabla 2 se encuentran enumerados estos componentes junto con la función que desempeña cada uno. Además, en el Anejo I se encuentran detalladas todas las características y funciones de cada uno de ellos, además, de la justificación de su elección.



Tabla 1. Componentes del sistema de alimentación del equipo de monitorización. Fuente: elaboración propia.

| COMPONENTE | FUNCIÓN EN EL EQUIPO |
|--|---|
| SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA | |
| Módulo fotovoltaico de silicio policristalino SHS modelo ESPMC050, 50W, 18,3V (Vmp), 2,73A (Imp). Marca: Era Solar | Obtención de energía eléctrica de la radiación solar |
| Batería Li-Ion modelo 12V12Ah-1D2X Marca: Vari Core | Acumular energía eléctrica |
| Controlador de carga MPPT para baterías de litio 3s-18650, modelo BQ24650 Marca: Walfront | Regular los procesos de carga y descarga de la batería |
| Sensor de tensión, módulo FZ0430 | Controlar el estado del sistema de alimentación |
| Indicador nivel de carga modelo xw228dkfr4, Marca Xtori | Conocer in situ el estado del nivel de carga de la batería |
| Interruptor de tres pines | Encendido y apagado del equipo y del indicador nivel de carga |
| ACONDICIONAMIENTO DE ALIMENTACIÓN | |
| Fusible 1 A | Protección frente a sobrecorrientes |
| Regulador de tensión LM7809 | Proporcionar una salida de tensión continua y estable de 9V |
| Condensadores de 0.33 y 0.1 μ F | Eliminar la tensión de rizado |

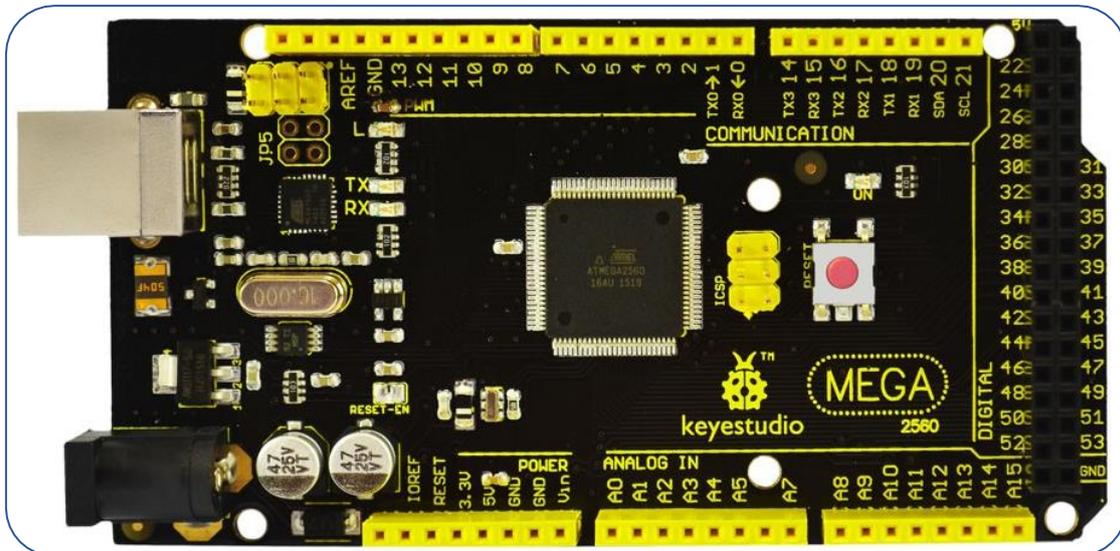


Figura 2. Placa microcontrolador Keyestudio Mega 2560 R3. Fuente: KEYESTUDIO, 2019.



Tabla 2. Componentes de adquisición y almacenamiento de datos del equipo de monitorización. Fuente: elaboración propia.

| COMPONENTE | FUNCIÓN EN EL EQUIPO |
|---|--|
| Placa Keyestudio mega 2560 r3, Marca Keyestudio | Gestionar del equipo y tomar datos de los sensores |
| Módulo GSM/GPRS sim900, Marca Keyestudio | Permite a la placa almacenar los datos en la nube, en la plataforma Thingspeak y envío de avisos vía SMS |
| Módulo microSD, marca Catalex | Permite a la placa almacenar datos en tarjeta SD |
| Módulo DS3231, Marca Maxim | Permite a la placa obtener la temperatura del equipo, así como la fecha y hora de forma precisa |

6.1.2. Componentes complementarios, implementación y puesta a prueba

Si bien en el apartado anterior se han mostrado los elementos de hardware del equipo de monitorización del sistema DAQ, en el presente se procede a realizar lo propio con los componentes que posteriormente serán necesarios para llevar a cabo la implementación y puesta a prueba del equipo desarrollado.

Para poner a prueba el sistema DAQ desarrollado, se ha decidido monitorizar las variaciones del diámetro del tronco de un cerezo en campo utilizando un dendrómetro. Este sensor es un sensor de desplazamiento lineal de alta precisión empleado en el campo agronómico para medir las variaciones en el crecimiento del tronco de los árboles o de los frutos y con ello obtener parámetros con los que conocer el estado hídrico de las plantas, su crecimiento, como le influyen las condiciones ambientales o gestionar riegos. En el apartado 2.1.sensor de puesta a prueba, dendrómetro del anejo I se da más información acerca del funcionamiento de este tipo de sensores.

En este caso el dendrómetro empleado para la puesta a prueba del equipo de monitorización está basado en el sensor de desplazamiento lineal L.V.D.T., Solartron Metrology, modelo DFg \pm 2,5 mm, Bognor Regis, UK, precisión \pm 10 μ m, Figura 3, y se instalará en un portasensor construido con material invar (aleación de Ni y Fe) y aluminio (coeficiente de dilatación próximo a 0).



Figura 3. Sensor de desplazamiento lineal L.V.D.T., Solartron Metrology, modelo DFg \pm 2,5mm.
Fuente: RS COMPONENTS Ltd., 2019

Además del dendrómetro, son necesarios otros componentes para llevar a cabo la implementación y puesta a prueba. Con ellos se alimenta el sensor y se acondiciona su señal para ser leída por el equipo de monitoreo.



Para su alimentación, el equipo compartirá su módulo solar con el sistema de alimentación del sensor. Además, se hará uso del mismo tipo de batería, aunque esta tendrá una menor capacidad de almacenaje (3Ah) y puesto que se emplea el mismo módulo solar y tipo de batería el regulador de carga del sistema de alimentación del sensor también será el mismo que se empleó para el equipo de monitoreo. En el apartado 2.1.3 Alimentación del sensor del Anejo I, se explica cómo el módulo solar es capaz de abastecer a ambos sistemas, además, se justifica la elección de estos elementos y se da más información acerca de las características de la batería empleada.

Además de estos elementos en el sistema de alimentación del sensor se ha hecho uso de un módulo relé con el que el microcontrolador es capaz de abrir y cerrar el circuito de alimentación del dendrómetro. De este modo conecta y desconecta la alimentación del sensor, con lo que en los periodos de inactividad permite apagar la alimentación del sensor y se ahorra energía, alargando la autonomía y la vida útil de la batería del equipo del sensor. El módulo usado es el modelo TE213 del fabricante XCSOURCE. Consúltense el apartado 2.1.4. Control de funcionamiento del Anejo I para mayor información

Para llevar a cabo el acondicionamiento de la alimentación nuevamente se han empleado un fusible de 1 A; un regulador de tensión, en este caso de 12V y dos condensadores de 0.33 y 0.1 μ F. Además de estos elementos ha sido necesario emplear un convertidor de voltaje DC-DC con el que se aumentan los 12V de salida de la batería del equipo del sensor a 24V. Este aumento del voltaje se lleva a cabo para permitir al regulador ofrecer adecuadamente un voltaje constante y estable de 12 V al sensor con el que conseguir siempre una señal fiable y estable. De no instalar este componente, el regulador no tendría voltaje suficiente para su funcionamiento y el sensor no se alimentaría siempre con el mismo voltaje, lo que supondría que la señal de salida no sería fiable, ya que para una misma posición podría dar distintos valores en función del voltaje de alimentación de cada momento.

En cuanto a los componentes del acondicionamiento de la señal del dendrómetro, se emplean en primer lugar resistencias de 39k Ω y 10k Ω . Estas resistencias son empleadas en el circuito para crear divisores de tensión resistivos con los que se consigue disminuir la tensión máxima de salida del sensor de 7,15V a 5V. Esta acción es necesaria puesto que el microcontrolador no es capaz de leer señales con tensión superiores a 5V, además de que estas sobretensiones lo pueden dañar. En el apartado 2.1.6. Acondicionamiento señal lvdt del Anejo I se explican estos problemas y se detalla y justifica el uso de estas resistencias, así como se explican los cálculos llevados a cabo para su elección. En segundo y último lugar se emplean diodos rectificadores 1N407. Este componente solo es capaz de transmitir corriente en una dirección. Debido a esta característica se ha empleado para evitar que la corriente eléctrica tenga un voltaje negativo a la salida de la señal del sensor. Sus características se encuentran en el apartado 2.1.6. Acondicionamiento señal lvdt del Anejo I.

6.1.3. Esquemas de conexiones y eléctricos

Tanto para el equipo de monitorización principal del sistema DAQ como para el equipo del sensor o equipo complementario se han realizado esquemas de montaje y conexión de componentes y esquemas eléctricos. Conjuntamente, se muestran los prototipos fabricados en base a estos esquemas con la identificación de cada una de sus partes. Todos estos esquemas se encuentran en el Anejo II Esquemas del sistema hardware.



A las conexiones y circuitos eléctricos del acondicionamiento de la señal del sensor se le da en este anejo gran importancia, teniendo exclusivamente para él un apartado. En él se explica el proceso llevado a cabo para su desarrollo entrando en detalle. En un primer momento se explica detalladamente como se lleva a cabo la reducción de tensión de la señal del dendrómetro mediante el uso de un divisor de tensión. En segundo lugar, se pasa a la conversión de las tensiones de la señal negativas a positivas. Para ello se muestran las diversas opciones existentes hasta a fecha de realización del presente trabajo concluyendo que ninguna de ellas es viable para el presente caso. Es por ello que se decide desarrollar una solución específica para el caso. Esta consiste en un circuito específico en el que se instalan diodos rectificadores y con el que se consigue convertir las tensiones negativas en positivas, sabiendo la posición exacta del núcleo del sensor y mejorando su precisión. Se aconseja la consulta del apartado 2.2.2. Conversión de tensiones negativas a positivas en la que se desarrolla esta solución. Por último se explica cómo se ha llevado a cabo la integración de ambas soluciones en un solo y se muestran diversos esquemas con los que se ve el circuito de acondicionamiento funcionando en sus diversas posibilidades.

6.2. SOFTWARE DEL SISTEMA

En los anteriores capítulos se ha hablado y explicado el hardware del dispositivo, su funcionamiento y el porqué de su elección. En el presente capítulo, se procede a explicar el software creado e instalado en el equipo.

Para la creación y carga en el microcontrolador del software se ha empleado un ordenador y el programa de desarrollo de software libre Arduino IDE (Integrated Development Environment o Entorno de Desarrollo Integrado). El programa de desarrollo IDE se caracteriza por estar diseñado expresamente para la creación y carga de software en placas del tipo empleado en este trabajo, así como por tener un entorno muy sencillo de uso (ARDUINOCC, 2019). Por ello se ha decidido emplear este programa para el desarrollo y carga del software en el equipo. Para su uso, el programa es instalado y ejecutado en el ordenador. Una vez hecho esto, con él se desarrolla y escribe el software que se quiere que sea ejecutado por el microcontrolador. Una vez escrito, se conecta la placa del microcontrolador al ordenador a través de USB y se carga el software en el mismo. Cuando el software ha sido cargado en la placa, el microcontrolador comienza a ejecutar el software y, por tanto, a trabajar de forma autónoma.

En cuanto al software desarrollado, este consiste en un sketch (programa del microcontrolador) que está compuesto por una serie de códigos escritos en lenguaje similar a C++. Estos códigos, como se ha visto en el párrafo anterior, son desarrollados en un ordenador y se cargan en el microprocesador (ARDUINOCC, 2019). Una vez cargados son ejecutados por el microcontrolador, dándole las instrucciones necesarias para llevar a cabo las tareas automatizadas que se desean hacer, como son la lectura de sensores o el almacenamiento y envío de información.

Cabe mencionar que es posible incluir librerías de código libre en el sketch desarrollado. Dichas librerías son líneas de código escrito por terceros que facilitan la ejecución de una serie de funciones específicas. Estas se pueden emplear en cualquier proyecto con la finalidad de reutilizar código, con lo que se ahorra trabajo de programación. Además, para su uso, tan solo se requiere de la importación de la librería y definición de las variables necesarias para realizar la acción deseada, con lo que se consigue reducir el número de líneas de código obteniendo un sketch más sencillo tanto de hacer como de entender (CÁMARA, 2017). Debido a esta gran



ventaja que presenta el uso de librerías, en este trabajo se ha hecho uso de algunas de ellas, como posteriormente se detallará.

Los programas empleados en este tipo de placas se llaman sketch y constan de, al menos, dos partes diferenciadas, las cuales son obligatorias: función `setup()` y función `loop()`.

La primera, formada por la función `setup`, será la parte que se encarga de recoger la configuración del dispositivo con detalles como la velocidad de transmisión de la información (o baudios), la inicialización de los puertos serie que se vayan a emplear y la asignación de pines (entradas y salidas analógicas y digitales) y solamente se ejecutará una vez al inicio del programa. Una vez finalizado el `setup` se ejecuta constantemente el `loop` (MARTÍNEZ, 2015).

La segunda parte, formada por función `loop`, se corresponde con el bucle que contiene el programa principal, donde se incluyen todas las sentencias necesarias para obtener la funcionalidad deseada (CÁMARA, 2017). En él se programan las instrucciones que queremos realizar periódicamente, como la lectura o escritura de datos sobre los pines digitales y analógicos deseados. Puesto que es un bucle, se debe controlar el periodo de ejecución del mismo con alguna instrucción. Esta es `delay` (milis) siendo milis el tiempo en milisegundos que el programa esperará hasta pasar a la siguiente línea (o volver a repetir el bucle si esa instrucción era la última línea del `void loop`) (MARTÍNEZ, 2015). Esta segunda parte puede darse el caso de que sea demasiado extensa o compleja, lo que puede conllevar problemas de funcionamiento. Como solución a este problema se pueden emplear funciones complementarias a la función principal `loop`. Estas funciones complementarias son utilizadas por la función principal `loop`, y en ellas se recogen partes del código principal, haciendo que éste se simplifique y con ello se eviten problemas de mal funcionamiento.

Antes de la función `setup()`, se pueden añadir comentarios de cómo es el funcionamiento del sketch. Además, se incluyen todas las librerías necesarias, se definen todos y cada uno de los pines utilizados, y se declaran las variables y constantes globales, las cuales se usarán a lo largo de todo el programa pudiendo ser empleadas por varias funciones (MARTÍNEZ, 2018; ALONSO, 2018).

Véase el Anejo III: Software del sistema, en el que se realiza una explicación detallada del código de programación desarrollado e instalado en el equipo. Decir tiene que en este caso el código desarrollado en este sketch consta de las tres partes diferenciadas anteriormente. También es posible consultar el código completo del sketch en el Anejo IV: Código.

7. PRESUPUESTO

A lo largo de este trabajo son numerosas las ocasiones en las que se hace referencia al bajo costo de los componentes empleados en la solución propuesta. Es por ello que se incluye un presupuesto con el precio de todos los componentes principales del sistema de adquisición de datos desarrollado. Hay que tener en cuenta que el costo real de la solución llevada a cabo será superior al reflejado en este presupuesto. Esto es debido a que en el coste total de la solución hay que tener en cuenta, además del coste de sus componentes, el coste de las horas de trabajo dedicadas, tanto para su desarrollo. como para su fabricación.

A continuación, en la Tabla 3, se muestra el presupuesto con el precio de los componentes empleados en la solución propuesta.



Tabla 3. Presupuesto componentes solución propuesta. Fuente: elaboración propia.

| COMPONENTES EQUIPO DE MONITORIZACIÓN SISTEMA DAQ | | | |
|--|-----------------|----------------------|-------------------|
| COMPONENTE | CANTIDAD | PRECIO UD.(€) | IMPORTE(€) |
| Módulo fotovoltaico de silicio policristalino SHS modelo ESPMC050, 50W, 18,3V (Vmp), 2,73A (Imp). Marca: Era Solar | 1 | 49,16 | 49,16 |
| Batería Li-Ion modelo 12V12Ah-1D2X Marca: Vari Core | 1 | 25,67 | 25,67 |
| Controlador de carga MPPT para baterías de litio 3s-18650, modelo BQ24650 Marca: Walfont | 1 | 13,00 | 13,00 |
| Sensor de tensión, módulo FZ0430 | 2 | 1,88 | 3,76 |
| Indicador nivel de carga modelo xw228dkfr4, Marca Xtori | 1 | 1,42 | 1,42 |
| Interruptor de tres pines | 2 | 0,32 | 0,64 |
| Fusible 1 A | 1 | 0,20 | 0,20 |
| Regulador de tensión LM7809 | 1 | 0,40 | 0,40 |
| Condensador | 2 | 0,85 | 1,70 |
| Placa Keyestudio mega 2560 r3, Marca Keyestudio | 1 | 13,59 | 13,59 |
| Módulo GSM/GPRS sim900, Marca Keyestudio | 1 | 22,76 | 22,76 |
| Módulo microSD, marca Catalex | 1 | 1,69 | 1,69 |
| Módulo DS3231, Marca Maxim | 1 | 3,00 | 3,00 |
| Caja de conexiones IP56 PVC | 1 | 13,19 | 13,19 |
| <i>TOTAL</i> | | | <i>150,18</i> |
| COMPONENTES COMPLEMENTARIOS, IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA A PRUEBA | | | |
| COMPONENTE | CANTIDAD | PRECIO UD.(€) | IMPORTE(€) |
| Batería Li-Ion modelo Dii-12V3000, Marca Liitokala | 1 | 5,45 | 5,45 |
| Controlador de carga MPPT para baterías de litio 3s-18650, modelo BQ24650 Marca: Walfont | 1 | 13,00 | 13,00 |
| Sensor de tensión, módulo FZ0430 | 1 | 1,88 | 1,88 |
| Módulo relé modelo TE213, Marca XCSOURCE | 1 | 1,70 | 1,70 |
| Fusible 1 A | 1 | 0,20 | 0,20 |
| Regulador de tensión LM7809 | 1 | 0,40 | 0,40 |
| Condensador | 2 | 0,85 | 1,70 |
| Convertidor de voltaje dc-dc, modelo FS12D24S1 Marca Fulree | 1 | 5,16 | 5,16 |
| Resistencia 39k Ω | 2 | 0,20 | 0,40 |
| Resistencia 10k Ω | 2 | 0,20 | 0,40 |
| Diodo rectificador 1N4007 | 2 | 0,13 | 0,26 |
| Caja conexiones IP55 PVC | 1 | 6,35 | 6,35 |
| <i>TOTAL</i> | | | <i>36,9</i> |
| <i>INSUMOS (líquidos reactivos, soldadura...)</i> | | | <i>50</i> |
| IMPORTE TOTAL | | | 237,08 |



8. IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA A PRUEBA DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En el presente apartado se describe la implementación de la solución propuesta. Esta consiste en la puesta en funcionamiento del prototipo construido, empleando los componentes, esquemas y software seleccionados y diseñados para llevarlo a cabo. El prototipo se muestra en el Anejo V junto a algunas imágenes de su proceso de construcción. También se enseñan y aclaran algunas de las técnicas usadas para llevar a cabo la construcción del prototipo. Además, se presentan y explican algunos componentes accesorios diseñados, construidos e instalados en este proceso de implementación y que serán empleados posteriormente en su puesta a prueba mediante su instalación en campo.

Por otra parte, también se lleva a cabo una puesta a prueba del mismo, con el que se comprueba que el prototipo funciona correctamente, que ningún componente es problemático y que la solución diseñada es realmente válida y funcional. Además, en la comprobación de su funcionamiento se detectan y plantean posibles mejoras a realizar en el futuro. Para llevar a cabo el testeo se han empleado los componentes indicados en el Anejo I, los esquemas y conexiones del Anejo II, y el software de los Anejos III y IV. Concretamente la puesta a prueba se basa en la monitorización de un dendrómetro basado en un sensor de desplazamiento L.V.D.T e instalado en un cerezo de una parcela de cerezos situada en Biar (Alicante).

8.1. IMPLEMENTACIÓN

Para llevar a cabo la puesta en funcionamiento del prototipo se realizan pruebas con los distintos módulos y el microcontrolador, con el objetivo de comprobar su buen funcionamiento. De este modo se ha verificado, en primer lugar, que las conexiones entre el microcontrolador y los distintos módulos son correctas y funcionan adecuadamente. En segundo lugar, se comprueba que el software desarrollado funciona correctamente. Como resultado, en este proceso de pruebas se optimiza el programa de funcionamiento, la configuración y las conexiones del prototipo.

Una vez comprobado el buen funcionamiento de los componentes principales del mismo se procede a su montaje. Para llevar a cabo el montaje se emplean cajas eléctricas estancas (IP55 e IP56), en cuyo interior se instalan todos los componentes, quedando así protegidos del entorno. Para poder realizar la instalación de las cajas en campo de forma fácil y segura se ha diseñado, fabricado e instalado en ellas unos soportes con asa. Igualmente, para la instalación de la placa solar en campo ha sido necesario diseñar y fabricar un soporte, en este caso capaz de regularse tanto en altura como en inclinación, para conseguir un mejor funcionamiento del módulo solar. En la Figura 4 se muestran los soportes tanto de las cajas como del módulo solar ya instalados en campo.

Para llevar a cabo el montaje de todos los elementos en sus respectivas cajas eléctricas, estos se han montado, tras presentarlos y buscarles la mejor posición, sobre unas láminas plásticas con el uso de tornillos y separadores. Una vez fijados en las láminas todos los elementos, estas se han montado en el interior de las cajas de nuevo con tornillos. Asimismo, se ha realizado una ventana con cristal en la tapa de la caja del equipo de monitoreo a través de la cual se ve el indicador de carga. Además, la batería se ha fijado con tiras elásticas, lo que hace que pueda ser fácilmente extraíble y montable. Los conectores instalados en las paredes de las cajas se han



instalado con refuerzos, así como con arandelas de goma para garantizar la estanqueidad del compartimento.



Figura 4. Soportes diseñados, fabricados e instalados en las cajas de los equipos y en el módulo solar. Fuente: elaboración propia.

Para llevar a cabo las conexiones del módulo solar con el equipo de monitoreo y con el equipo del sensor se han empleado en ambos casos cable de alimentación de dos hilos de $0,75\text{mm}^2$ y un conector macho junto a otro hembra. Para conectar el equipo de monitoreo con el equipo del sensor se han empleado cuatro conectores, dos macho y dos hembra, además de un cable de 7 hilos. En todos los casos los cables se han unido a los conectores mediante soldadura y se han aislado las uniones con tubo termoretráctil

Para la instalación y conexión de los elementos sueltos de los sistemas de acondicionamiento, como los fusibles, condensadores y resistencias, se ha diseñado y fabricado placas de circuito impreso PCB (de sus siglas en inglés) en las que se instalan estos componentes. Con ello se consigue dar un soporte a estos elementos a la vez que se conectan unos con otros, a través del circuito impreso en la misma. En cada caso, los elementos disponen en la placa de una posición y un circuito específicos, que corresponden a los diseñados. Además, a estas placas se les realizan orificios que permiten su instalación en la caja con tornillos y separadores, al igual que el resto de componentes. En el apartado 1.3.1. Soporte y sujeción de elementos sueltos del Anejo V se detalla y justifica la creación de estas placas y, además, se explica detalladamente su proceso de fabricación.

Por último, se lleva a cabo la calibración del dendrómetro con el prototipo. Este proceso de calibrado es necesario para poder obtener con el prototipo y el dendrómetro lecturas de las variaciones de distancia del núcleo del sensor en micras respecto de una posición de referencia. Con la calibración de estos dos elementos se consigue relacionar la medida en bytes obtenida con el prototipo con la medida en micras de la posición del núcleo en el sensor respecto del punto de referencia. De este modo, se consigue que el equipo pueda obtener la variación de la posición del núcleo del sensor en micras y con ello poder realizar la comprobación del funcionamiento del prototipo.



El calibrado del sensor con el prototipo se ha llevado a cabo en el laboratorio. Para ello, se ha hecho uso de un soporte universal de laboratorio, unas galgas, pie de rey, piezas planas de grosor conocido y un ordenador, además del prototipo, el sensor y su equipo.

Básicamente el calibrado se lleva a cabo estableciendo un punto de referencia u origen, en este caso un extremo del dendrómetro. En él se coloca el núcleo y se relaciona esta posición con la lectura en bytes recibida en el procesador. Las lecturas de la posición del núcleo en el sensor efectuadas por el microcontrolador son mostradas en bytes, adquiriendo valores desde 0 a 2047, lo que hace un total de 2048 valores, puesto que se toma lectura del sensor con dos entradas analógicas del microcontrolador ($1024 + 1024 = 2048$). Siendo de 0 a 1023 los valores para las posiciones del núcleo de la parte interna hasta la zona media del sensor, respectivamente medidos con el pin A2. Y siendo de los valores 1024 a 2047 la posición del núcleo desde la parte media del sensor a la externa o menos interna, medidos con el pin A2.

Posteriormente, se mueve el núcleo por todo el dendrómetro anotando la distancia que le separa del punto de referencia y la lectura del dendrómetro para esos puntos. De este modo se obtienen múltiples lecturas de todo el rango por el que se mueve el núcleo por el interior del sensor, todas ellas relacionadas con la distancia que tenía el núcleo en el momento de su obtención. De este modo se correlacionan las lecturas en bytes del prototipo con las distancias del núcleo en micras al punto de referencia.

Los datos obtenidos se muestran representados en la Figura 5.

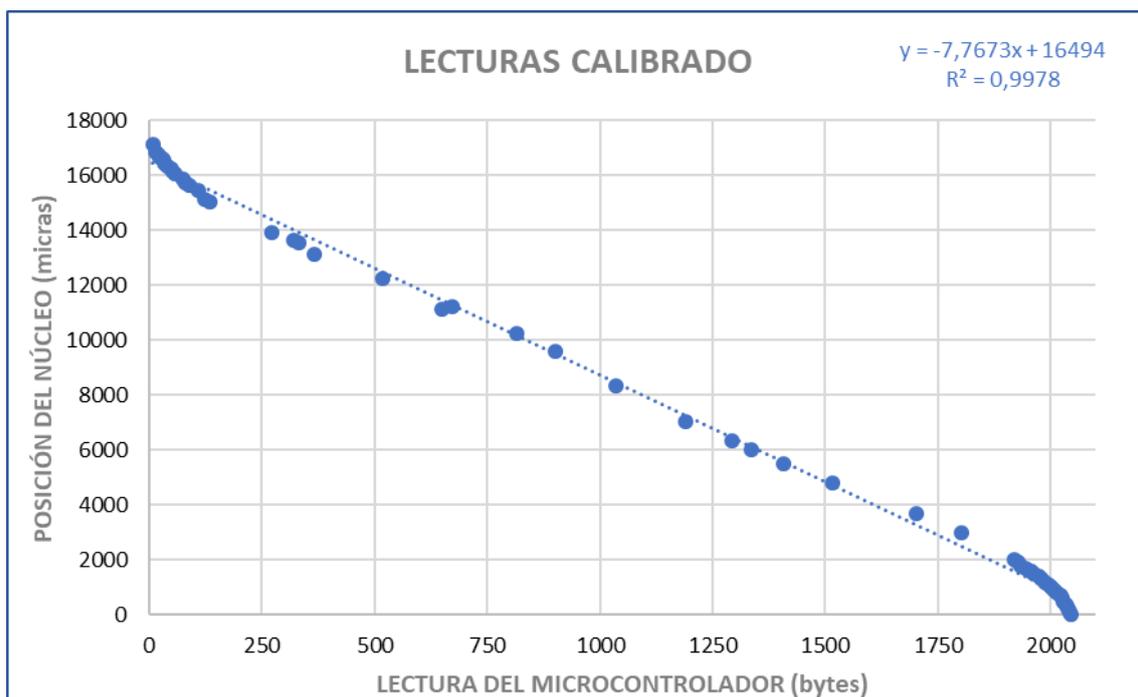


Figura 5. Representación de los resultados obtenidos de la calibración del dendrómetro. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, de forma general la distribución de los puntos obtenidos en la representación corresponde a una línea recta de ecuación $y = -7,7673x + 16494$ con un $R^2 = 0,9978$ donde “y” es la posición en micras del núcleo en el interior del sensor y “x” es el valor en bytes leído por el microcontrolador.



Examinando esta representación más detalladamente, puede observarse que, en los extremos de la recta, se produce una desviación respecto de la misma. En cambio, el resto de puntos de la zona central se ajusta perfectamente a una recta. Este aspecto es característico de este tipo de sensores, dando valores poco fiables en sus extremos.

Debido a ello, y con el fin de evitar lecturas erróneas, se decide ir eliminando progresivamente los valores de los extremos hasta obtener una recta de calibrado lo más ajustada posible tratando de eliminar la menor cantidad posible de valores. Decir que el descarte de valores se ha realizado por igual en ambos extremos y de forma progresiva hasta llegar al punto en el que se estabiliza y no mejora el ajuste de la recta de calibrado obtenida. En la Figura 6 se muestra la representación de los valores de calibración tanto antes (en azul) como después (en verde) de realizar los descartes, así como las rectas de calibrado de ambos casos.

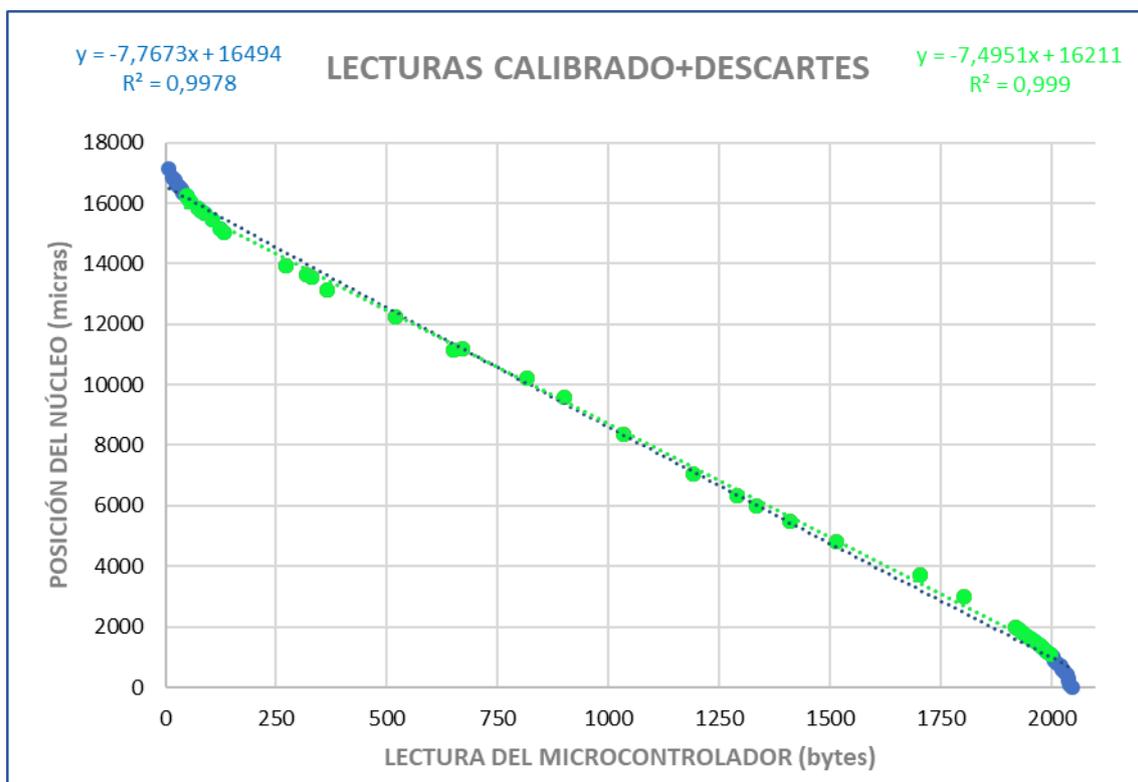


Figura 6. Representación de los resultados obtenidos de la calibración antes (valores en azul) y después (valores en verde) de su ajuste. Fuente: elaboración propia.

Con todo ello se ha obtenido que la recta de calibrado es $y = -7,4951x + 16211$ con un ajuste $R^2 = 0,999$ superior al obtenido anteriormente sin eliminar las lecturas de los extremos.

Este último ajuste es el que se ha utilizado en el software como calibrado del equipo de monitorización. Para ello se emplea la función map con la que se transforman los valores obtenidos en bytes a los valores ya calibrados en micras. Ello se consigue indicándole a esta función para cada pin de lectura del sensor la equivalencia entre su byte 0 y su posición correspondiente según la recta de calibrado obtenida y la equivalencia entre su byte 1023 y su posición correspondiente según la recta de calibrado obtenida.

Hay que tener en cuenta que los bytes de cada pin analógico de lectura del sensor se corresponden con un byte de los mostrados en la calibración ya que en esta se tienen en cuenta las lecturas de ambos pines como ya se ha comentado anteriormente. Por tanto, para las



lecturas realizadas con el pin A1, su byte0 se corresponde con el byte 2047 del calibrado y el byte 1023 se corresponde con el byte 1024 del calibrado. Para las lecturas realizadas con el pin A2, su byte0 se corresponde con el byte 1023 del calibrado y el byte 1023 se corresponde con el byte 0 del calibrado.

Teniendo en cuenta este aspecto, se procede al cálculo de los valores de posición en micras correspondientes a los bytes 0 y 1023 de cada pin con la recta de calibrado $y = -7,4951x + 16211$ para llevar a cabo el calibrado del microcontrolador por software, véase apartado 1.3.2. Calibrado del sensor con el prototipo, del Anejo V.

Como resultado se tiene, que la función map a emplear para las lecturas efectuadas con el pin A1 será: $\text{sensor1} = \text{map}(\text{sensor1}, 0, 1023, 8536, 869)$. Con ella se transforma el byte 0 a 8536 micras y el byte1023 a 869 micras.

En cambio, para las lecturas efectuadas con el pin A2 será: $\text{sensor2} = \text{map}(\text{sensor2}, 0, 1023, 8544, 16211)$. Con ella se transforma el byte 0 a 8544 micras y el byte1023 a 16211 micras.

En base a estas relaciones de transformación todas las lecturas efectuadas por el microcontrolador se transformarán a micras.

Teniendo en cuenta el rango de distancia que es capaz de leer este sistema en micras, y que este realiza la lectura de dicho rango con 2048 bytes se obtiene que la precisión del sistema es de 7,5 micras. A continuación, se muestra el cálculo de la precisión:

$$\text{Precisión dendrómetro}(\mu) = \frac{16211 - 869}{2048} = 7,5\mu$$

Puesto que en campo los dendrómetros se emplean para medir fluctuaciones de los troncos y frutos, y estos suelen tener variaciones diarias de centenas de micras, la precisión obtenida con el equipo y el sensor es más que suficiente para monitorizar estas variaciones puesto que son capaces de obtener medidas inferiores a la decena, llegando a detectar variaciones de 7,5 micras.

Téngase en cuenta que el proceso de calibrado se explica detalladamente con el apoyo de imágenes en el apartado 1.3.2. Calibrado del sensor con el prototipo, del Anejo V.

Con ello se da por finalizado el proceso de implementación, quedando el prototipo y el sensor listos para ser puestos a prueba. Para mayor información acerca del proceso de implementación véase el apartado 1. Implementación, del Anejo V, en el que se explica minuciosamente el proceso de implementación llevado a cabo, apoyando cada paso de este en imágenes.

8.2. PUESTA A PRUEBA DEL PROTOTIPO

La puesta a prueba del prototipo en este caso consiste en comprobar el funcionamiento en campo del equipo desarrollado con la solución propuesta. Con ello se verifica que la solución desarrollada no contiene errores que puedan hacerla fallar, y se confirma que cumple los objetivos marcados. Además, permite comprobar posibles mejoras a efectuar.

Las características del prototipo que se van a someter a prueba son:

- Ha de ser capaz de monitorizar la señal de sensores. En este caso, se ha seleccionado un dendrómetro basado en un sensor de desplazamiento L.V.D.T.



- Ha de ser autónomo, obteniendo su energía de funcionamiento de una placa solar y almacenándola en una batería.
- Ha de hacer uso de su modo de trabajo en bajo consumo en periodos de inactividad, con el fin de ahorrar energía y aumentar así su autonomía.
- Debe almacenar los datos obtenidos, tanto del sensor de desplazamiento como de los distintos sensores que controlan su estado, en internet de las cosas, IoT. Más concretamente en la plataforma Thingspeak, pudiéndose consultar los datos de forma remota. Además, también debe guardar estos datos en una tarjeta microSD.
- Debe realizar avisos vía SMS al número de teléfono deseado, bien por falta de energía en su batería o en el sensor, o bien, por exceso de temperatura interna.
- Ha de ser resistente, protegiendo a sus componentes del entorno.
- Su instalación en campo ha de realizarse con facilidad gracias a los soportes desarrollados y a los conectores utilizados.

Para llevar a cabo esta puesta a prueba, se utiliza todo el equipo desarrollado, construido y programado que ha sido descrito en este trabajo, incluido el sensor LVDT ya calibrado.

La puesta a prueba del prototipo se lleva a cabo con un dendrómetro, basado en un sensor de desplazamiento lineal L.V.D.T. (de las siglas en inglés Linear Variable Differential Transformer).

Este tipo de sensores es empleado en el campo agronómico, para la monitorización precisa de micro-variaciones del diámetro del tronco o de frutos a lo largo del tiempo. Estas variaciones proporcionan una información precisa del crecimiento y estado hídrico de la planta (ORTUÑO *et al.*, 2010), obtenida a escala diaria de los ciclos de contracción y expansión del diámetro de tronco (KOZLOWSKI, 1967) provocados, principalmente, por cambios del contenido de humedad de la planta (SIMONNEAU *et al.*, 1993). (IRVINE y GRACE, 1997) observaron que más del 90% de las fluctuaciones diarias del diámetro de tronco tienen lugar en los tejidos del floema.

Estas medias, de gran precisión, se han utilizado para el establecimiento de parámetros sensibles a los aportes de agua de riego (IRVINE y GRACE, 1997), siendo la máxima contracción diaria de tronco (MCD; (HUGUET *et al.*, 1992)) el más utilizado como indicador de la intensidad de estrés hídrico (CONEJERO *et al.*, 2010; INTRIGLIOLO y CASTEL, 2007; ORTUÑO *et al.*, 2010). (GOLDHAMER y FERERES, 2004) consideraron que era posible establecer precisos programas de riego basados en las variaciones del diámetro de tronco. Esta nueva estrategia surge a partir del concepto de intensidad de señal (IS), que relaciona los valores de MCD de árboles sin limitaciones hídricas con los valores de árboles sometidos a un estrés (DE LA ROSA *et al.*, 2015), siendo posible el control de la duración e intensidad del estrés al que es sometido el árbol (CONEJERO *et al.*, 2011; CONEJERO *et al.*, 2010; DE LA ROSA *et al.*, 2015; GOLDHAMER y FERERES, 2004; MORIANA *et al.*, 2000; ORTUÑO *et al.*, 2010; PUERTO *et al.*, 2013).

Por tanto, se puede usar un dendrómetro basado en un sensor de tipo L.V.D.T. para definir varios parámetros, los cuales se relacionan con el estado hídrico de la planta. Por ello, este tipo de sensores pueden ser utilizados, como indicador del estado hídrico de la planta, para la programación del riego como ya apuntaba (GONZALEZ-ALTOZANO, 1998).

Con todo ello este tipo de sensores permite, por tanto, llevar a cabo las siguientes aplicaciones:

- Monitorización en continuo del proceso de crecimiento de la planta.



- Monitorización del estado hídrico de la planta.
- Análisis de la influencia de los factores ambientales en el crecimiento.
- Determinación del inicio y final del periodo de crecimiento.
- Gestión del riego.

Para que este método sea útil debe estar integrado en un sistema de monitorización en tiempo real, como es el caso del dispositivo desarrollado, lo que hace a este tipo de sensores idóneos para el testeado del equipo. Ese hecho unido a todas las virtudes de este tipo de sensores en el campo agronómico, comentadas anteriormente, hace que para llevar a cabo la verificación del funcionamiento del equipo se emplee un dendrómetro como sensor a monitorizar por el prototipo desarrollado.

El dendrómetro seleccionado para tal fin es el dendrómetro basado en un sensor de desplazamiento lineal L.V.D.T., Solartron Metrology, modelo DFg $\pm 2,5$ mm, Bognor Regis, UK, precisión ± 10 μ m. Véase apartado 2.1.2. Dendrómetro seleccionado del Anejo I para mayor información acerca de este sensor y su principio de funcionamiento.

Para que el prototipo pueda monitorizar este sensor en el ensayo es necesario que el sensor disponga de un sistema de alimentación y de acondicionamiento de la tensión de alimentación y de la señal propios, cuyos componentes y esquemas se han descrito en los apartados 2.1. Sensor de puesta a prueba, dendrómetro del Anejo I y 2.2. Esquemas específicos del sistema de acondicionamiento de señal del Anejo II. Este equipo desarrollado para el sensor es instalado junto al sensor y al prototipo principal para llevar a cabo el ensayo del mismo. En el apartado de implementación se puede ver el proceso de fabricación del mismo.

Además del equipo del sensor, para el ensayo, se instalará el sensor en un portasensor construido con material invar (aleación de Ni y Fe) y aluminio con un coeficiente de dilatación próximo a 0.

Con el prototipo y el equipo del sensor resultantes de la implementación ya puestos a punto y calibrados, junto con sus accesorios y el dendrómetro, se procede a llevar a cabo la comprobación de la solución propuesta. Para ello se instala el prototipo en campo donde se va a poner en funcionamiento y se va a encargar de la monitorización de la señal del dendrómetro con el que se medirán las fluctuaciones del diámetro del tronco de un cerezo durante un mes. A partir de este proceso de monitorización, y de los datos obtenidos de él, se realiza un análisis en busca de fallos o mejoras a realizar en el prototipo, además se comprueba si este ha cumplido los objetivos planteados.

La instalación y ensayo se realiza en una parcela dedicada al cultivo de cerezos. Concretamente, en la localidad de Biar, al noroeste de la provincia de Alicante, en la Parcela 13, del Polígono 11, zona conocida como El Toll, Véase Figura 7.



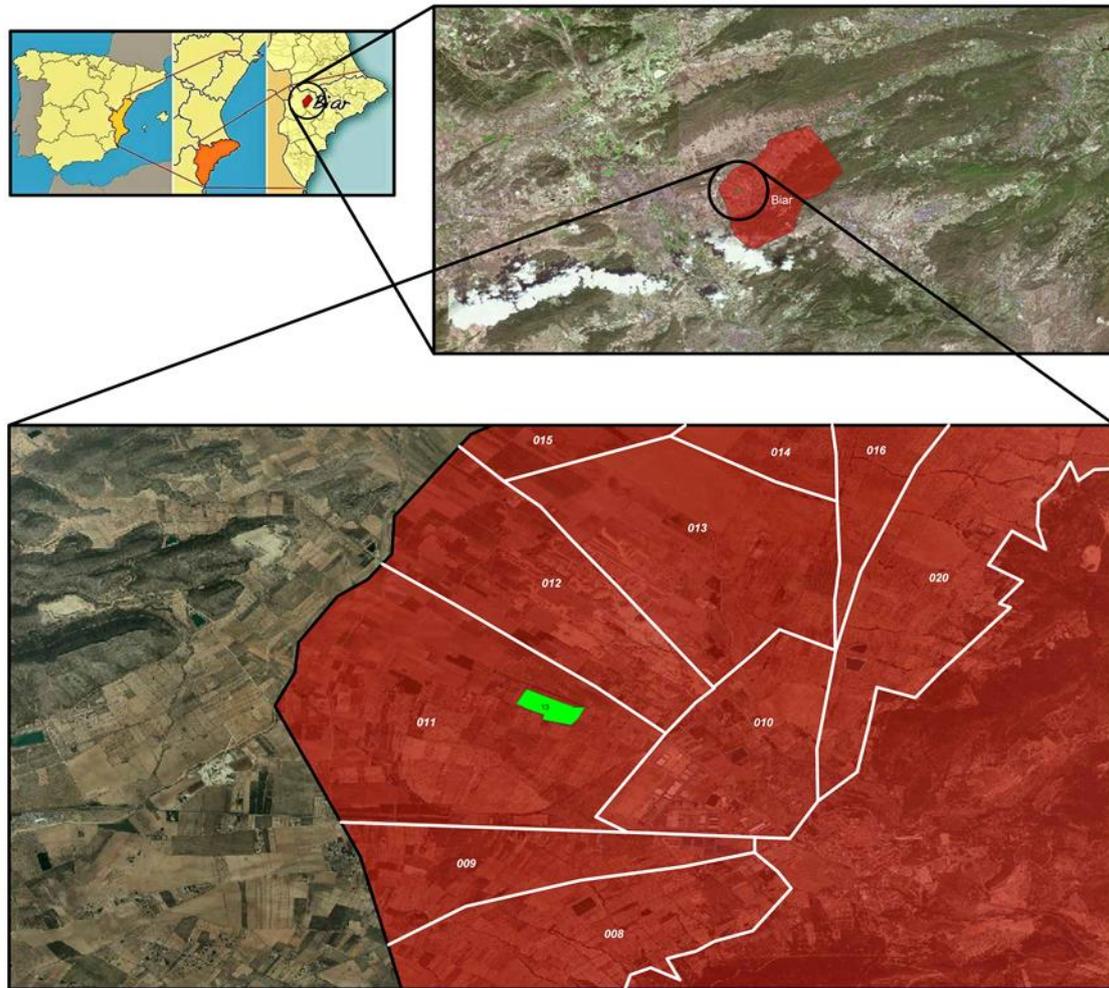


Figura 7. Situación y emplazamiento de la parcela de ensayo. Fuente: elaboración propia.

La instalación se realiza en el centro de la parcela. La placa solar se instala entre filas de árboles y el prototipo, junto al equipo del sensor, bajo el cerezo en el que se instala a su vez el dendrómetro. En la Figura 8 se muestra la instalación del equipo llevada a cabo.

Una vez instalado el equipo, este se pone en funcionamiento realizando las lecturas del dendrómetro periódicamente cada diez minutos y almacenando los datos obtenidos del dendrómetro y sus sensores internos tanto en la tarjeta microSD como en la plataforma Thingspeak. Además, también se deja preparado para el envío de avisos por batería baja y exceso de temperatura interna, los cuales se realizarán tras la lectura y almacenamiento de datos.

Con esta puesta en funcionamiento del prototipo se comienza el monitoreo del dendrómetro, lo que da lugar al comienzo del ensayo que se prolongó un mes aproximadamente. Pasado este tiempo se decidió concluir el testeo del mismo debido a que en el tiempo transcurrido ya se había:

- Solucionado los problemas y errores que hacían fallar al prototipo, habiéndose puesto a punto y comprobado el funcionamiento correcto durante diez días seguidos sin errores.
- Se solucionó un problema derivado de la entrada de agua de lluvia en el equipo del sensor. Tras la reparación y solución se comprobó el correcto funcionamiento durante otra semana.



- Recabado información suficiente para comprobar el cumplimiento de los objetivos concretados para la solución propuesta.
- Obtenido información suficiente para realizar mejoras en el equipo



- 1 Vista general de la instalación.
- 2 Instalación de los equipos con el dendrómetro.
- 3 Instalación sensor con portasensor.
- 4 Instalación del núcleo al tronco del árbol en el sensor.

Figura 8. Instalación de equipos y dendrómetro en campo. Fuente: elaboración propia.



8.3. RESULTADOS DE LA PUESTA A PRUEBA

La puesta a prueba de la solución propuesta se prolongó aproximadamente un mes. En algunas semanas de este periodo de prueba surgieron problemas y fallos en el equipo que impidieron su correcto funcionamiento y que se fueron solventando a medida que surgían. En otras, tras solventar estos problemas y fallos se continuó con la puesta a prueba del equipo, obteniendo información del mismo para comprobar su correcto funcionamiento y para conocer las posibles mejoras que se le pueden efectuar a la solución propuesta.

Por ello los resultados del testeo del equipo se van a presentar en dos bloques, el primero de ellos dedicado a los problemas y fallos que han tenido lugar durante el periodo de prueba. El segundo de ellos se dedica a la información obtenida durante el periodo de monitoreo.

8.3.1. Fallos y problemas detectados durante el periodo de prueba del equipo.

A continuación, se presentan tanto fallos o errores detectados en el prototipo, como los problemas surgidos durante la prueba, así como las soluciones llevadas a cabo en cada caso.

El primer problema surgió con el sistema de alimentación en el cual en un principio se habían instalado tanto una placa solar como una batería con insuficiente capacidad tanto de obtener energía como de almacenarla tiempo suficiente para el correcto funcionamiento del equipo, no garantizándose la autonomía del mismo. Para solucionar este problema se cambiaron por la batería y módulo mostrados en el apartado de componentes. Esta elección se realizó para el módulo a partir de la potencia demandada por el fabricante del regulador de tensión. Para la batería se calculó el consumo que tenía el equipo con la batería antigua y a partir de ahí se instaló una con autonomía para un día, suficiente para permitir realizar la puesta a prueba, aunque es recomendable que dicha batería tenga capacidad suficiente para alimentar al equipo más de tres días. En este caso no se instaló una batería mayor para reducir costes puesto que tan solo se ha desarrollado el prototipo para su puesta a prueba. Véase el apartado 3.1.4 del anejo V para mayor información.

Otro problema detectado al principio del periodo de prueba, consiste en que el equipo dejaba de funcionar adecuadamente pasado un día. Se sospechaba que esto sucedía porque se llenaba la memoria RAM del equipo quedando este bloqueado puesto que reiniciándolo volvía a funcionar correctamente. Por ello se decidió monitorizar el tiempo que llevaba ejecutándose el programa del equipo y la memoria RAM libre. Como resultado se comprobó que efectivamente el equipo se bloqueaba porque se llenaba la memoria RAM. Como solución se decidió hacer que el equipo se reinicie y por ello se libere su RAM cuando lleve ejecutando su programa 6.500.000 milisegundos. De este modo se solucionó este problema y el equipo no volvió a dar fallos de este tipo.

A partir de este momento el equipo comenzó a funcionar de forma correcta. Tan solo puntualmente surgían problemas con el módulo DS3231 y el envío de datos a la plataforma thingspeak. Para su solución se soldaron directamente las conexiones de los módulos al microcontrolador con lo que dejaron de surgir estos problemas debidos a unas deficientes conexiones.

Tras resolver todos los problemas mencionados, se continuó con el ensayo y comprobación del equipo. Estuvo funcionando correctamente durante diez días, leyendo datos del dendrómetro y almacenándolos junto al resto de información de control del equipo. Pero en el décimo día surgió un nuevo problema. Se produjeron tormentas estivales, y como consecuencia de estas



entró agua en el equipo del sensor, cortocircuitando el sistema de acondicionamiento de señal, así como los conectores. Como consecuencia de ello los datos obtenidos y almacenados por el prototipo del sensor comenzaron a ser erróneos. Para solucionar este problema fue necesario desmontar el equipo del sensor, limpiar todos sus componentes y se tuvo que volver fabricar y montar la placa de acondicionamiento del sensor. Se mejoró la estanqueidad de la caja donde se montaba toda la circuitería del equipo del sensor. Una vez hecho esto se volvió a montar todo y se instaló en campo, continuando con el testeo. Tras la reparación del equipo del sensor, el equipo de monitorización volvió a funcionar adecuadamente obteniendo datos correctos hasta que se dio por finalizado el testeo del prototipo una semana después.

8.3.2. Información resultante de la puesta a prueba

Entre la información obtenida en el proceso de testeo se encuentran los datos recogidos del dendrómetro por el prototipo, los datos del estado del prototipo y los avisos emitidos por este durante el periodo de prueba en campo.

8.3.2.1. Datos leídos y almacenados del dendrómetro y estado del prototipo

Como resultado de la puesta a prueba del equipo se ha comprobado que ha sido capaz de almacenar tanto en la tarjeta microSD como en la plataforma IoT Thingspeak las lecturas del dendrómetro, temperatura interna del equipo de monitoreo, voltajes de la batería del equipo de monitoreo y del equipo del sensor, voltaje de la placa solar, tiempo en funcionamiento y memoria RAM disponible.

De forma general, se observa que los datos almacenados por el equipo para todas las variables tienen unos valores y dinámicas correspondientes con los esperados para cada una de ellas, a excepción del periodo comprendido entre en 6 y 24 de junio para el dendrómetro, en el que, a causa de las lluvias, el equipo del sensor se había estropeado y ofrecía una señal errónea. Y a excepción de periodo de tiempo comprendido entre el día 18 y el 24 de junio.

A modo de ejemplo, se pueden ver en la Figura 9 los datos obtenidos del dendrómetro a través de la app ThingViewFull. En su parte superior se muestran todos los datos del monitoreo del sensor pudiéndose ver ampliados los dos periodos de tiempo en los que funcionó todo correctamente. En la parte inferior izquierda de esta figura se amplía la visualización de estos mismos datos para el periodo comprendido entre el 27 de mayo y el 6 de junio del año 2019. De igual modo en la parte inferior derecha de la Figura 17 se amplían los datos del periodo comprendido entre el 24 de junio y el 3 de julio.

Desde el día 27 de mayo hasta el 6 de junio del año 2019 se ve que los valores del dendrómetro rondan las 5000 micras. En cambió entre el 24 de junio y el 3 de julio rondan las 3000 micras. Este hecho se debe a que las lecturas de los dendrómetros son relativas a una posición concreta. Por ello para su utilización en agronomía hay que hacer continuos reposicionamientos. En este caso concreto, es debido a que el dendrómetro se reinstaló, por lo que el núcleo quedo reubicado en otra posición en este segundo periodo. A priori puede parecer que los datos estén mal tomados, pero no es así. Además, para hacer uso de estos datos suele emplearse un parámetro denominado Amplitud de Contracción que no es más que la diferencia en valor absoluto que hay entre el valor máximo y el mínimo de cada día. Es decir, para su utilización se emplea la distancia que ha recorrido el núcleo del dendrómetro entre dos momentos, no su distancia al punto considerado como origen, que en este caso es uno de los extremos del sensor y es el valor que se observa en el monitoreo del dendrómetro.



En estos periodos de tiempo, tan solo se dan ciertas lecturas puntuales erróneas, las cuales se han de descartar a la hora de emplear los datos, puesto que se deben a fallos puntuales de conexión del sensor con el equipo o a alguna manipulación del mismo. A pesar de ello, se observa con claridad la dinámica de dilatación y contracción diaria del tronco del cerezo monitorizado. La variación de la Amplitud de Contracción del tronco del cerezo promedio durante estos días es de alrededor de 500 micras. Puede observarse como durante las horas nocturnas el valor de las lecturas aumenta, lo que quiere decir que el núcleo del dendrómetro se adentra en él, hecho que sucede al aumentar el diámetro del troco. Por tanto, en estas horas se registra un aumento del diámetro del troco, debido a que durante las horas nocturnas hay una disminución de la evapotranspiración y el árbol es capaz de tomar más agua del suelo a través de sus raíces que la que pierde por transpiración. En cambio, en las horas diurnas sucede lo contrario, las lecturas disminuyen su valor, lo que significa que el núcleo del dendrómetro es extraído de él, hecho que sucede al disminuir el diámetro del troco. Por tanto, en las horas diurnas se registra una contracción del tronco del árbol que es producida por el aumento de la transpiración, que el árbol no puede compensar con el agua que toma por las raíces. Ello supone la pérdida relativa de agua del árbol y la contracción del tronco.

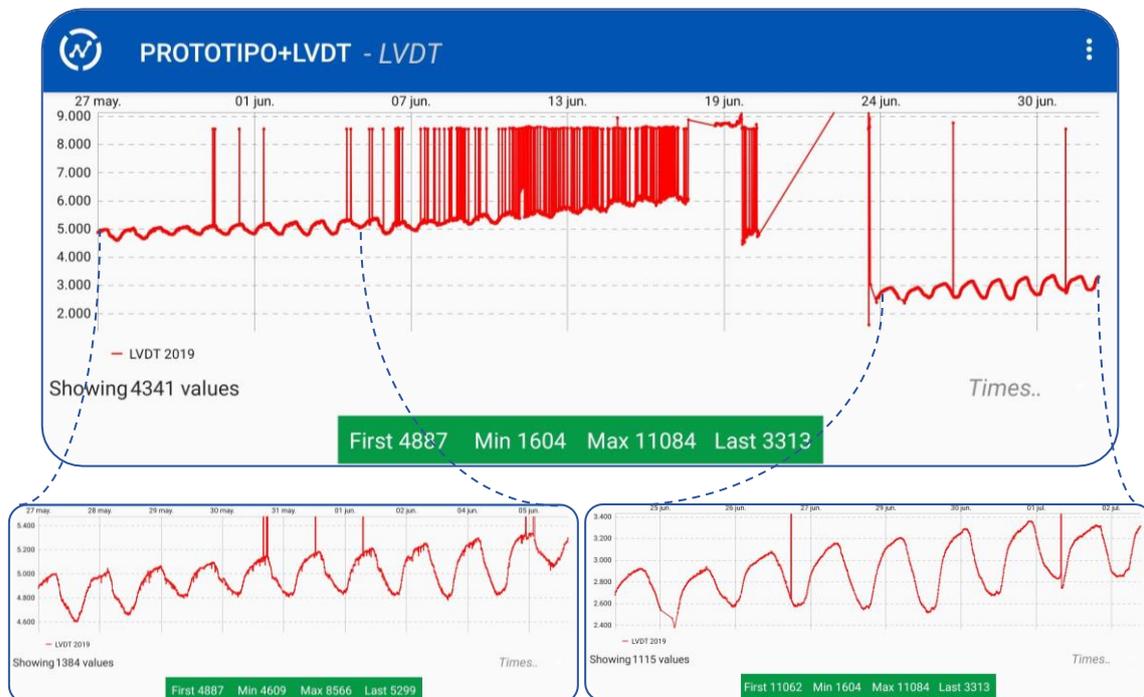


Figura 9. Datos almacenados en Thingspeak, monitorización del dendrómetro. Fuente: elaboración propia.

También se muestran a modo de ejemplo los datos del voltaje de la batería del equipo de monitoreo en la Figura 10. En estos se pueden observar las fases de carga y descarga de la batería a lo largo de los días de puesta a prueba, así como el periodo en el que este se detuvo, comprendido entre los días 18 y 24 de junio. Cabe destacar en este caso, que, tras este parón, y dado que no se habían recargado las baterías, al volver a poner prueba el prototipo, este se encontró con la batería descargada. Por ello el equipo realizó envío de mensajes de aviso por batería baja. A pesar de todo, gracias a su sistema de recarga, estas fueron recargadas por el equipo del sensor. En ningún caso se el nivel de carga de las baterías bajó por debajo del umbral mínimo establecido para ellas de 11,05V durante el periodo de testeo salvo en este caso por el motivo citado, no por un mal funcionamiento del sistema de alimentación.



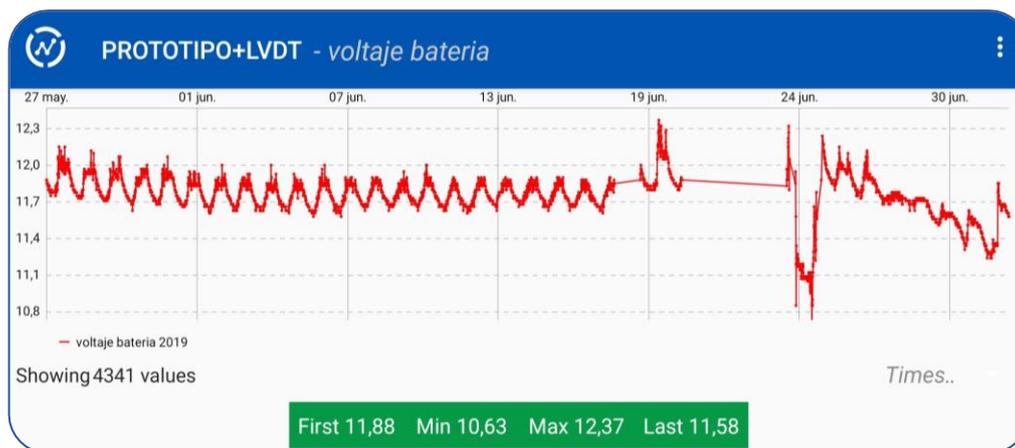


Figura 10. Datos almacenados en Thingspeak, voltaje batería del prototipo. Fuente: elaboración propia.

En el apartado 2.4.2. Información resultante de la puesta a prueba del Anejo V, se muestran los datos obtenidos a través de la aplicación THingViewFull para todas las variables, realizando un análisis detallado de los datos obtenidos para cada una de ellas.

Los datos obtenidos en el proceso de puesta a prueba anteriormente mostrados han sido obtenidos de la plataforma IoT Thingspeak a través de la app ThingViewFull. Estos valores pueden ser consultados tanto a través de la app como mediante un ordenador a través de la página web <https://thingspeak.com/>. Si se hace uso de la página web, es posible descargar los datos en formatos json, xml y csv. Además, también es posible realizar en la propia página análisis y visualización de los datos con Matlab entre otras aplicaciones.

En cuanto a la información almacenada en la tarjeta microSD, se comprueba que se ha almacenado de forma correcta la fecha y hora en que se realiza la lectura y almacenamiento de cada dato, así como los valores de todas las variables almacenadas en la plataforma Thingspeak a excepción del tiempo que lleva en ejecución el programa y la memoria RAM libre del microcontrolador. Para su almacenamiento en la tarjeta microSD los datos se guardan delimitados por puntos y comas en un archivo de tipo texto llamado Datalog.

Cabe destacar que los datos almacenados en la tarjeta microSD coinciden con los datos almacenados en la plataforma Thingspeak, aunque no exactamente, puesto que en algunas ocasiones los datos tienen pequeñas diferencias, que en ningún caso llegan a ser significativas. Dichas diferencias en algunos valores, son debidas a ínfimos errores producidos por el desfase de tiempo que se produce entre la toma de los datos subidos a Thingspeak y la de los datos almacenados posteriormente en la tarjeta microSD. A pesar de ello y como ya se ha indicado, estas diferencias no son significativas, por lo que puede considerarse que los datos almacenados coinciden (tarjeta microSD con los de la plataforma Thingspeak). Por ello se puede afirmar, que la información anteriormente detallada sobre los datos obtenidos de Thingspeak es igualmente aplicable a los datos obtenidos en la tarjeta microSD.

Para mayor información consúltese el apartado 2.4.2. Información resultante de la puesta a prueba del Anejo V.

8.3.2.2. Información del envío de avisos

Entre la información obtenida durante el periodo de ensayo se encuentran, además de los datos recogidos por el prototipo, tanto del dendrómetro como de su propio estado, los avisos emitidos por este. Durante el periodo de prueba se recibieron avisos del prototipo principalmente por



exceso de temperatura interna, aunque también se recibieron por falta de voltaje en la batería del prototipo. En cambio, no se recibieron avisos de la batería del sensor debido a que no se registraron datos de voltaje por debajo del umbral establecido (11,05V).

En cuanto a los avisos por temperatura interna excesiva, el prototipo está programado para mandar el aviso cuando la temperatura interna es superior a 40°C. El aviso se realiza mediante el envío de un SMS en el cual se muestra el texto "ALERTA, ALTA TEMPERATURA INTERNA, TEMPERATURA(°C)" seguido de la temperatura que registra en ese momento el prototipo en su interior. En la Figura 11 se pueden apreciar algunos de los avisos por exceso de temperatura recibidos en el periodo de prueba, la mayoría de ellos correspondientes a días de ola de calor.

Por otro lado, el prototipo está preparado para enviar avisos por batería baja cuando el voltaje de esta es inferior a 11,05V tanto si sucede esto con la batería del sensor como con la del prototipo. Durante el periodo de ensayo, tan solo se realizaron avisos por batería baja en el prototipo. Como ya se ha comentado, no se recibieron avisos de la batería del sensor ya que en este caso no fue necesario. Los avisos recibidos por SMS en el testeo por batería baja en el prototipo contienen el mensaje "ALERTA, BATERÍA CENTRALITA BAJA, VOLTAJE(V):" seguido del valor del voltaje de la batería en ese momento. El envío de este tipo de avisos tan solo tuvo lugar los días 24 y 25 de junio, tras la parada de la puesta a prueba en la que se descargó la batería, como ya se ha comentado. En la Figura 12 se muestran los mensajes recibidos. Posteriormente se recargó la batería con el sistema del prototipo y no se volvieron a recibir más mensajes.

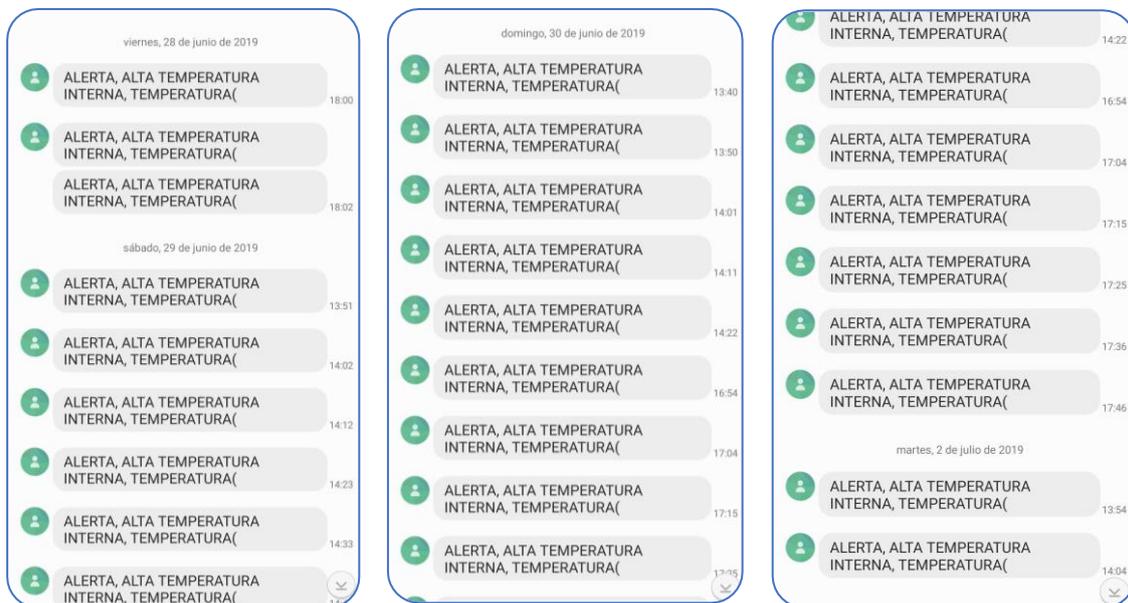


Figura 11. Mensajes de aviso recibidos en testeo por alta temperatura interna. Fuente: elaboración propia.



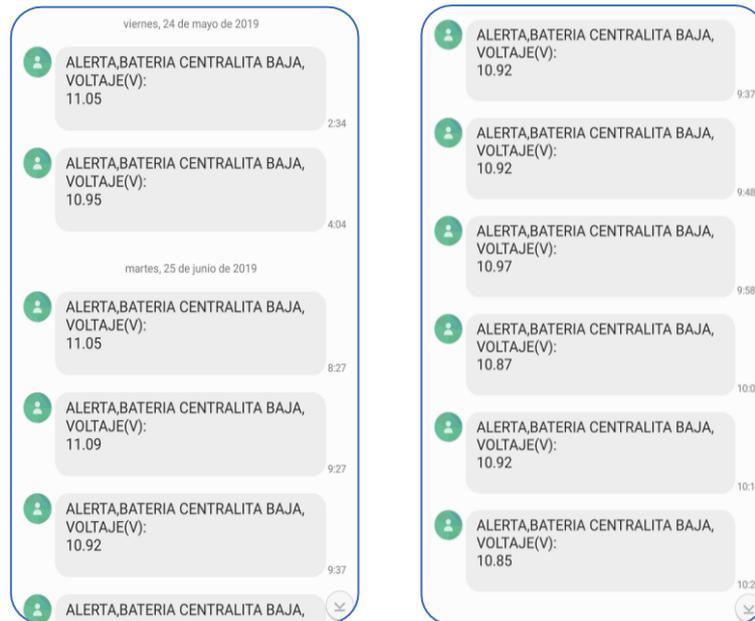


Figura 12. Mensajes de aviso recibidos durante el periodo de prueba por nivel de carga de la batería del prototipo bajo. Fuente: elaboración propia.

En todo caso se recomienda ver el apartado 2.4.2.2. Información del envío de avisos del Anejo V para mayor información.

8.4. CONCLUSIÓN DE LA PUESTA A PRUEBA

La prueba de control del funcionamiento del equipo desarrollado se ha realizado con éxito, a pesar de que han surgido diversos contratiempos, obteniendo las siguientes conclusiones de él:

Con el testeo se han detectado problemas y fallos en el prototipo, como son los fallos en el dimensionado de la alimentación, problemas de bloqueo del microcontrolador por llenado de la memoria RAM, fallos en conexiones y falta de estanqueidad en el equipo del sensor. Todos estos problemas se han solucionado, y al final del testeo se ha verificado que el prototipo ya no contiene errores y funciona perfectamente.

Se ha comprobado que el prototipo cumple con sus objetivos, puesto que, ha sido capaz de realizar con éxito la lectura y almacenamiento de los valores de todas las variables deseadas, incluida la señal del dendrómetro, tanto en la plataforma Thingspeak como en la tarjeta microSD. Se considera que estos se han registrado satisfactoriamente porque se han obtenido datos con valores correctos. Los datos obtenidos se han podido consultar de forma remota, tanto mediante el uso de un ordenador a través de la página web de la plataforma Thingspeak, como con la app ThingViewFull con la que se consulta esta misma plataforma.

El prototipo también ha sido capaz de realizar avisos mediante el envío de SMS en los momentos en que se alcanzaron los valores umbral programados, tanto por exceso de temperatura, como por falta de carga en la batería.

Asimismo, se ha podido comprobar que el prototipo es realmente autónomo, puesto que una vez instalado no ha sido necesario recargar las baterías del mismo.

Adicionalmente, se ha comprobado que el equipo entra y sale de su modo de bajo consumo una vez transcurridos los diez minutos entre un registro de datos y el siguiente.



Igualmente, se ha comprobado que el prototipo es capaz de proteger sus componentes frente a las inclemencias ambientales, puesto que ha soportado tanto tormentas estivales como olas de calor sin que se vea afectado ninguno de sus componentes. En cambio, no ha sucedido lo mismo con el equipo del sensor, que emplea otro tipo de caja, al cual le entro agua y estropeó algunos componentes. Por ello se debe utilizar el mismo tipo de caja que la instalada en el prototipo para ambos equipos (o una todavía más estanca).

Por último, al llevar a cabo la instalación del prototipo y sensores se ha podido comprobar que esta se puede llevar a cabo con facilidad en campo.

De este periodo de ensayo se plantean diversas mejoras. Entre ellas, se encuentra hacer uso de cajas y conectores de mayor estanqueidad para evitar problemas como los surgidos en el testeo con el equipo del sensor. Otra mejora a poder realizar sería instalar un módulo GSM/GPRS sim900 capaz de encenderse con el microcontrolador por software, para evitar de este modo tener que abrir el equipo cada vez que este se conecta para encender dicho módulo. Por otro lado, también se le podría instalar una pantalla lcd en la que visualizar los datos que se están registrando y junto con algunos botones poder configurar las distintas funciones del equipo.

A modo de conclusión final, podemos afirmar que con el ensayo del prototipo se ha verificado que éste carece de errores que puedan hacerlo fallar, funciona perfectamente y cumple sobradamente los objetivos inicialmente planteados.



9. BIBLIOGRAFÍA

ABDULLAH, A.; BARNAWI, A., 2012. Identification of the type of agriculture suited for application of wireless sensor networks. *Rus. J. Agric. Socio. Econ. Sci.*, 12(2): 19-36.

ABREU-CUSTODIO, M.C., 2015. *Diseño de un Cargador de Baterías de Litio*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

ALONSO, E.B., 2018. *Diseño de un instrumento basado en Arduino para la medida de irradiancia solar*. Escuela de ingenierías industriales. Universidad de Valladolid.

ARDUINOCC, 2019. ArduinoCC. <https://www.arduino.cc/en/main/software>. Consultado el 12 de marzo de 2019.

BORDÓN, M.S., 2010. *Estudio y análisis de un regulador de carga de baterías*. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés.

CÁMARA, R.A., 2017. *Arduino + módulo GSM/GPRS: monitorización, automatización y gestión remota en un viñedo*. Universitat Oberta de Catalunya.

CONEJERO, W.; ORTUÑO, M.F.; MELLISHO, C.D.; TORRECILLAS, A., 2010. Influence of crop load on maximum daily trunk shrinkage reference equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. *Agricultural Water*, 97: 333-338.

CONEJERO, W.; MELLISHO, C.D.; ORTUÑO, M.F.; MORIANA, A.; MORENO, F.; TORRECILLAS, A., 2011. Using trunk diameter sensors for regulated deficit irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Environmental and Experimental Botany*, 71:409-415.

DE LA ROSA, J.M.; DOMINGO, R.; GÓMEZ-MONTIEL, J.; PÉREZ-PASTOR, A., 2015. Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees. *Agricultural Water Management*, 152:207-216.

DI, J. P.; GERTZ, E., 2013. Atmospheric monitoring with arduino. *Maker Press.*, 1:150.

DURSun, M.; OZDEN, S., 2011.. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Sci. Res. Essays*, 6(7):1573-1582.

GOLDHAMER, D.A.; FERERES, E., 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, 23:11-19.

GONZALEZ-ALTOZANO, P., 1998. *Riego deficitario controlado en "Clementina de Nules": Relaciones hídricas y respuesta agronómica*. Tesis doctoral.

HUGUET, J.G.; LI, S.H.; LORENDEAU, J.Y.; PELLOUX, G., 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science*, 67:631-640.

INTRIGLIOLO, D.S.; CASTEL, J.R., 2007. Crop load affects maximum daily trunk shrinkage of plum trees. *Tree physiology*, 27: 89-96.

IRVINE, J.; GRACE, J., 1997. Continuous measurements of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta*, 202:455-461.



JUNIOR, M. M.; NUNES, R. O.; CELINSKI, V. G., 2012. Evaluation of the use of a microcontroller measures the platform Arduino sensor data in electrical conductivity of solo. *Brasil. Rev. Eng. Tecnol*, 4:52-57.

KASAEI, S. H.; KASAEI, S. M.; KASAEI, S. A., 2011. Design and development a control and monitoring system for greenhouse conditions based-on multi agent system. *Broad Res. Art. Intel. Neur. (BRAIN)*, 2(4):28-35.

KEYESTUDIO, 2019. Keystudio. <https://keyestudio.com>. Consultado el 5 de julio del 2019.

KOZLOWSKI, T.T., 1967. Diurnal variations in stem diameters of small trees. *Botanical Gazette*, 123:60-68.

MARTÍNEZ, S.V., 2015. *Diseño de un Sistema de Captura y procesamiento de Señales*. Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales. Universitat Politècnica de València.

MARTÍNEZ, A.B., 2018. *Diseño e implementación de un sistema de control de iluminación natural basado en arduino*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universitat Politècnica de València.

MORIANA, A.; FERERES, E.; ORGAZ, F.; CASTRO, J.; HUMANES, M.D.; PASTOR, M.; 2000. The relations between trunk diameter fluctuations and tree water status in olives trees (*Olea europaea* L). *Acta Horticulturae*, 293-297.

Ni, 2019. National instruments. <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. Consultado el 15 de julio del 2019.

ORTUÑO, M.F.; CONEJERO, W.; MORENO, F.; MORIANA, A.; INTRIGLIOLO, D.S.; BIEL, C., 2010. Could trunk diameter current knowledge and future perspectives current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97: 1-11.

PUERTO, P.; DOMINGO, R.; TORRES, R.; PÉREZ-PASTOR, A.; GARCÍA-RIQUELME, M., 2013. Remote management of deficit irrigation in almond trees based on maximum daily trunk shrinkage: Water relations and yield. *Agricultural Water Management*, 126: 33-45.

REVERTER, F.; PALLAS-ARENY, R., 2005. *Direct sensor-to-microcontroller interface circuit design and characterisation*. Ed. Marcombo, Barcelona, España.

RIGHINI, R.; ROLDÁN, A.; GROSSI, G.H.; ARISTEGUI, R.; RAICHIJK, C., 2010. *Nueva red de estaciones de medición de la radiación solar*. XXXIII Congreso de ASADES. Asades.

RS COMPONENTS Ltd., 2019. RS Components Ltd. <https://es.rs-online.com/web/>. Consultado el 24 de mayo del 2019.

SIMONNEAU, T.; HABIB, J.; GOUTOULY, J.P.; HUGUET, J.G.; 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*.

VENTURA, F.; FACINI, O.; PIANA, S., 2010. Soil moisture measurements: comparison of instrumentation performances. *Journal of irrigation and drainage engineering. E-Asce*, 136(2): 81-89.

VIDAL, A.M., 2018. *Diseño integrado de un bombeo de agua de 850 kW con energía solar fotovoltaica en el término municipal de Benifaió (Valencia)*. Valencia, 2018.

