

04-022

DEVELOPMENT OF A LOW-COST SMART SYSTEM FOR CROP MANAGEMENT AND MONITORING

López Carreño, Rubén-Daniel ⁽¹⁾; Molina Cuadrado, Alba ⁽¹⁾; Macarulla Martí, Marcel ⁽¹⁾; Gassó Domingo, Santiago ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de Catalunya

This work presents a low-cost, intelligent electronic system for crop management and monitoring based on Industry 4.0 technologies. The system automatically controls irrigation conditions according to the type of crop, its needs, and environmental conditions. To do this, a set of sensors that measure CO₂, relative humidity, temperature, and UV radiation in the environment is featured. With this data, the irrigation conditions for the plants to optimize their growth and reduce water and energy consumption are calculated. The quality of water quality is improved by adding additives that modify its physico-chemical characteristics. The volume of additives is estimated and automatically added to the water through pumps and valves controlled autonomously by the system. After that, the crops are automatically provided with the exact amount of water previously estimated to maximize their development. The readings obtained from the sensors, as well as the irrigation and plant development conditions, are stored in a database. A user interface allows for the display of the data and, in addition, for manual control of the system, configuration of the type of crop, its needs and setting of alert signals.

Keywords: urban agriculture, IoT; Arduino; raspberry

DESARROLLO DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE BAJO COSTE PARA LA GESTIÓN Y MONITORIZACIÓN DE CULTIVOS

Este trabajo presenta un sistema electrónico inteligente para la gestión y la monitorización de cultivos basado en tecnologías de la Industria 4.0 de bajo coste. El sistema controla automáticamente las condiciones de riego según el tipo de cultivo, sus necesidades y las condiciones ambientales. Para ello, dispone de un conjunto de sensores que miden el CO₂, la humedad relativa, la temperatura y la radiación UV del ambiente. Con estos datos, calcula las condiciones de riego de las plantas para optimizar su crecimiento y reducir el consumo de agua y energía. La calidad del agua de riego es mejorada mediante la adición de aditivos que modifican sus características fisicoquímicas. El volumen de aditivos se estima y añade automáticamente al agua a través de bombas y válvulas controladas de forma autónoma por el sistema. Tras ello, se proporciona automáticamente a los cultivos la cantidad exacta de agua previamente estimada para maximizar su desarrollo. Las lecturas obtenidas con los sensores, así como las condiciones de riego y de desarrollo de las plantas, se almacenan en una base de datos. Una interfaz de usuario permite visualizarlos y, además, controlar manualmente el sistema, configurar el tipo de cultivo, sus necesidades y establecer señales de alertas.

Palabras clave: agricultura urbana; IoT; Arduino; raspberry

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer el apoyo recibido por la Agencia Estatal De Investigación a través de su PLAN ESTATAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA Y DE INNOVACIÓN 2017-2020. Esta investigación se enmarca en el proyecto de I+D SIRAH, referencia no.



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La población mundial se estima que alcanzará la cifra de los 10 mil millones de personas para el año 2050. De acuerdo con el World Resources Institute, para satisfacer la demanda de alimentos de manera sostenible, será necesario afrontar tres grandes desafíos en las próximas décadas (Searchinger et al., 2019).

El primero de ellos es superar la brecha del 56% que existe entre la cantidad de calorías producidas en 2010 por la agricultura y las que se necesitarán producir en 2050. En segundo lugar, también se prevé una falta de 593 millones de hectáreas de tierra agrícola a nivel mundial (dos veces la superficie de la India) que deberán estar disponibles al final de este periodo. Mientras, el tercer desafío que se debe enfrentar es la mitigación de 11 mil millones de toneladas adicionales de gases de efecto invernadero generados por los cultivos hasta el año 2050.

En este sentido, la agricultura urbana (AU) puede ayudar a solventar estos problemas, ya que permite aumentar la producción de alimentos sin incrementar la superficie agrícola y, adicionalmente, hacerlo de forma más próxima al consumidor final. Asimismo, la UA puede también contribuir a mejorar la sostenibilidad económica, social y medioambiental de las áreas urbanas (Specht et al. 2014). Algunas investigaciones han mostrado sus potenciales beneficios en campos tan diferenciados como la salud (Müller y Sukhdev, 2019), los materiales de construcción (Muñoz-Liesa et al. 2021) o la creación de empleo (Orsini et al. 2013), entre otros.

A su vez, la AU permite aprovechar espacios no utilizados para crear cultivos urbanos que mejoran el comportamiento térmico de los edificios y reducen su consumo energético (Bianchini, 2019). Es más, cuando estos se instalan en terrazas o tejados, se incrementa la capacidad de retención de agua de las ciudades, contribuyendo así a minimizar el efecto isla de calor durante el verano (Ventura et al., 2021).

En cuanto al sustrato, debe decirse que este tipo de agricultura es más adecuada para entornos urbanos cuando se realiza sin suelo mediante una solución de nutrientes para fertilizar los cultivos. Las razones de ello son, por un lado, que las cargas de peso que deben soportar los edificios son notablemente menores cuando se utilizan sustratos ligeros o medios de cultivo a base de agua, en comparación al uso de suelos. Por el otro, que la baja disponibilidad de suelos urbanos libres de contaminantes también es una fuerte barrera para su empleo.

No obstante, los sistemas sin suelo en la AU no están libres de impactos ambientales. En el caso de los sistemas tradicionales de riego sin recirculación de lixiviados, los nutrientes pueden acabar en la red de alcantarillado generando problemas de eutrofización y aumentando los costes de tratamiento de las aguas residuales. Aunque es posible implementar sistemas para la recirculación y la reutilización, éstos tienden a incrementar la complejidad de los cultivos y necesitan una mayor inversión económica.

Con el objetivo de facilitar el uso de la AU, se ha desarrollado un sistema inteligente de bajo coste para monitorizar y gestionar cultivos en invernaderos en el entorno urbano. El sistema dispone de una serie de sensores y modelos que, en función del tipo de cultivo y las condiciones ambientales, establece las condiciones de riego para optimizar el crecimiento de las plantas y reducir el consumo de agua y energía. La información generada por el sistema es almacenada en una base de datos, mientras que una interfaz de usuario permite su visualización y llevar a cabo diversas acciones de configuración y control. Gracias a ello se

puede llevar a cabo la AU de una manera más sostenible y barata en comparación a otras soluciones tradicionales para ciudades.

2. Descripción general del sistema

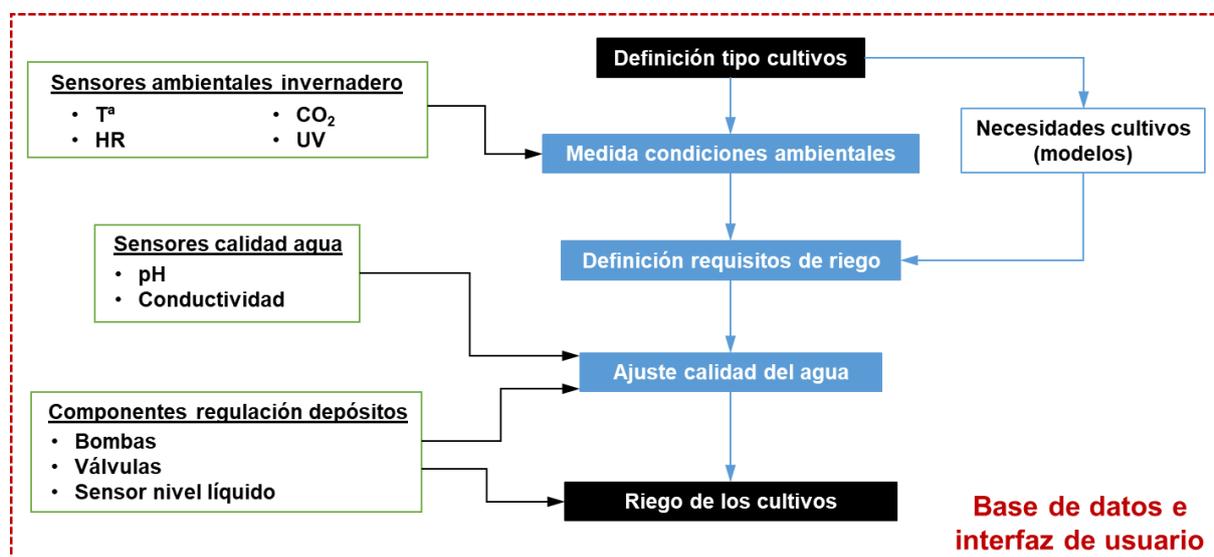
2.1. Proceso de funcionamiento

En la Figura 1 aparece el proceso de funcionamiento del sistema inteligente de riego, en el cual se indican los pasos seguidos por éste y los elementos que intervienen en cada uno de ellos. El detalle de cada uno de los pasos, así como de los equipos, algoritmos y modelos utilizados, se describe en apartados posteriores.

El funcionamiento del sistema se inicia con la definición del tipo de cultivos existentes en el invernadero. El sistema incluye de forma predeterminada varios tipos de cultivos (tomates, judías o lechugas, entre otros.) que pueden seleccionarse a través de la interfaz de usuario. Una vez definidos, automáticamente quedan establecidos los modelos matemáticos que permitirán calcular las necesidades de riego de las plantas en función de su tipo, edad y las condiciones ambientales en el invernadero.

Conociendo la tipología de cultivos y su fecha de plantación, el sistema mide las condiciones ambientales del invernadero mediante cuatro sensores de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ e incidencia de rayos UV situados en su interior. Estos parámetros, que influirán sobre las necesidades de riego de las plantas, son medidos periódicamente a lo largo del día con el objetivo de garantizar una continua monitorización del cultivo.

Figura 1: Proceso de funcionamiento del sistema



Seguidamente, se establecen cuáles son los requisitos de riego para maximizar el crecimiento de las plantas a partir de un modelo matemático desarrollado para tal fin (ver apartado 3). Estos requisitos se establecen en términos de cuantía de agua necesaria y de calidad. En caso de ser necesario, se lleva a cabo un ajuste del pH y la conductividad en aras de adaptar ambos parámetros fisicoquímicos a lo estimado. En cuanto al agua, ésta puede proceder tanto

de la red de suministro como de la captación de lluvias o de la recirculación del excedente de los riegos.

El pH y la conductividad se regula mediante la introducción de dos aditivos en el agua. Este proceso se realiza de forma automática mediante un sistema de bombas, válvulas y sensores de nivel de líquidos que regulan el volumen de aditivos, así como, en caso de ser necesario, introducen más agua en el depósito. Por último, el riego de las plantas se realiza también a través de unas bombas que proporcionan de forma automatizada la cuantía óptima de agua tratada a los cultivos.

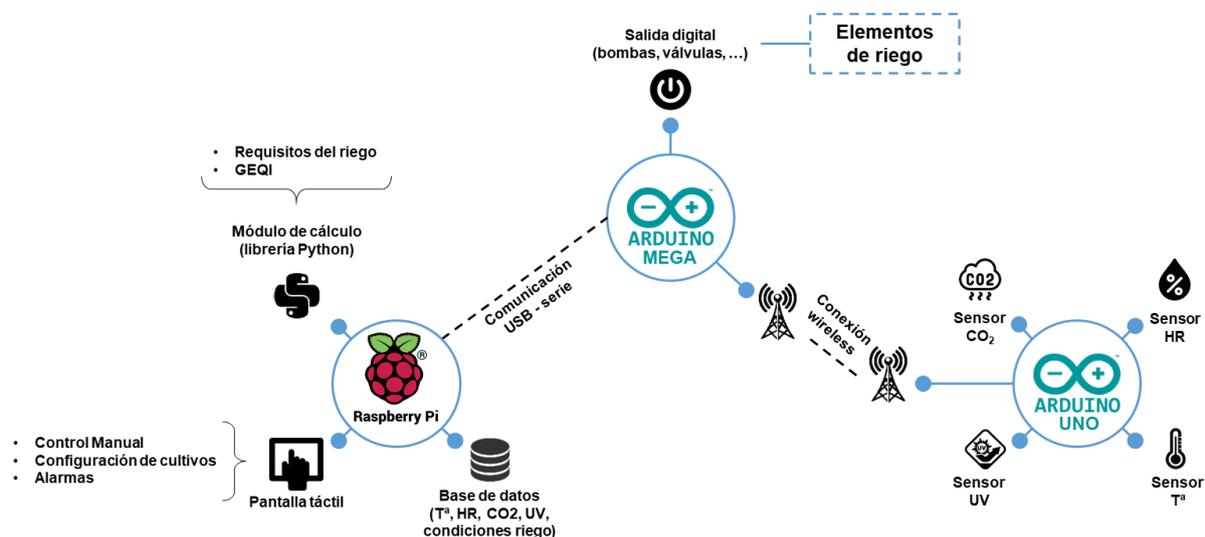
Los datos obtenidos por los diferentes sensores, así como las condiciones de riego se almacenan en una base de datos en la nube. Todos sus valores pueden ser visualizados a través de una interfaz de usuario, la cual también permite gestionar manualmente el sistema y realizar acciones adicionales como establecer señales de alerta.

2.2. Elementos del sistema

En la Figura 2 se puede observar el esquema con los principales elementos del sistema en cuanto a componentes electrónicos, mecánicos y de software. Todos estos elementos forman un único conjunto controlado por tres controladoras conectadas entre sí.

La primera de las placas es una Raspberry Pi® que se encarga de controlar la globalidad del sistema. Para ello, tiene programada una librería en Python que incluye los modelos para los cultivos en los invernaderos (ver apartado 3), así como para calcular los requisitos de riego. Además, esta librería también incluye un módulo para que los datos de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, radiación ultravioleta y condiciones de riego sean almacenados, tanto en la memoria de la placa como en la nube.

Figura 2: Esquema de elementos del sistema



En aras de facilitar la interacción con el usuario, se ha conectado una pantalla táctil a través de la cual se define la tipología de los cultivos. Esta pantalla, a su vez, permite realizar tanto un control manual del sistema de riego, activando y desactivando bombas y válvulas, como realizar otras acciones como el establecimiento de alarmas.

La segunda de las placas controladoras es un Arduino MEGA® que controla todos los elementos de riego del sistema, esto es, las bombas, las válvulas y los sensores que

intervienen en el ajuste de la cantidad y calidad del agua para regar. El detalle de estos elementos y su funcionamiento se muestra en el apartado 5. Es importante señalar que las órdenes de control son calculadas por la primera placa y recibidas por la segunda a través de un cable que las conecta.

En cuanto a la tercera placa controladora, se trata de un Arduino UNO® que tiene conectados cuatro sensores medioambientales. Éstos miden la concentración de CO₂ en el aire, la humedad relativa, la temperatura y la radiación ultravioleta. Los datos medidos son enviados por conexión inalámbrica a la segunda placa, la cual a su vez los transmite por cable a la primera. El hecho de usar conexión inalámbrica en la tercera placa controladora hace posible colocar los sensores en el interior del invernadero sin que el resto de elementos del sistema estén dentro de él, por lo que su gestión se puede realizar desde el exterior.

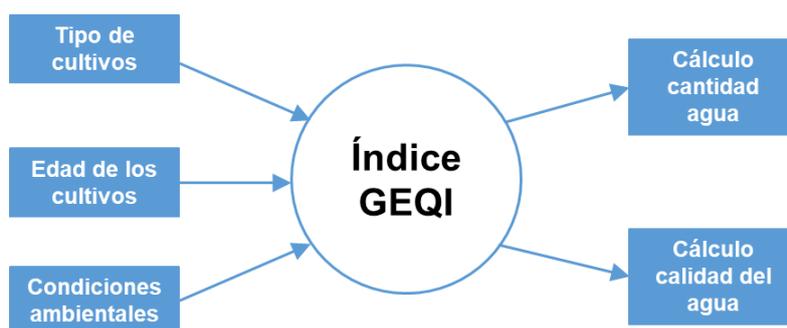
3. Modelo de los cultivos

El modelo matemático introducido en el sistema de gestión de cultivos es la metodología del Greenhouse Environmental Quality Index (GEQI), la cual fue desarrollada por grupos de investigación de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) a través del proyecto de investigación "Fertilecity II" (Fertilecity, 2022).

Este proyecto se centró en la implementación de la agricultura urbana (UA) en forma de invernaderos situados en cubiertas de edificios y generó una amplia gama de resultados en diversos ámbitos como la energía, la circularidad, el eco-diseño y el análisis del ciclo de vida. Asimismo, también sirvió para estudiar el metabolismo de la producción de alimentos dentro de este sistema de cultivo, focalizándose especialmente en la demanda de agua y nutrientes. A partir de los datos obtenidos se desarrolló la metodología GEQI, la cual se utiliza para el desempeño térmico de un invernadero para la producción óptima de cultivos.

Como muestra la Figura 3, la metodología define un único indicador (índice GEQI) que proporciona información acerca de la idoneidad de diversos parámetros en el interior del invernadero (temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y radiación UV) para garantizar el desarrollo óptimo de los cultivos.

Figura 3: Cálculo del índice GEQI y requisitos del agua de riego



Los valores de estos cuatro factores, medidos por los sensores del sistema desarrollado, junto al tipo de cultivos y su edad permiten el cálculo del índice en cualquier instante. Posteriormente y a partir de él, el modelo hace una estimación de la cantidad de agua que requieren las plantas y de su calidad. Ambos datos son enviados a la placa Arduino MEGA® para que esta active las bombas y válvulas necesarias para realizar el riego.

Cabe decir que los tipos de cultivo corresponden a tomates, lechugas y judías, entre otros, y los parámetros que ajustan el cálculo del índice para cada uno de ellos están previamente

establecidos en la librería de Python del sistema. De esta manera, el usuario únicamente debe seleccionar la tipología de planta en un menú desplegable e indicar la fecha en la que se cultivó para posteriormente calcular su edad.

4. Medida de las condiciones ambientales

El sistema de riego realiza la medida de las condiciones ambientales en el interior del invernadero mediante cuatro sensores conectados a una placa controladora Arduino UNO®. Ésta también dispone de una antena para transmitir de forma inalámbrica los datos recogidos por los sensores y procesarlos con los modelos de los cultivos.

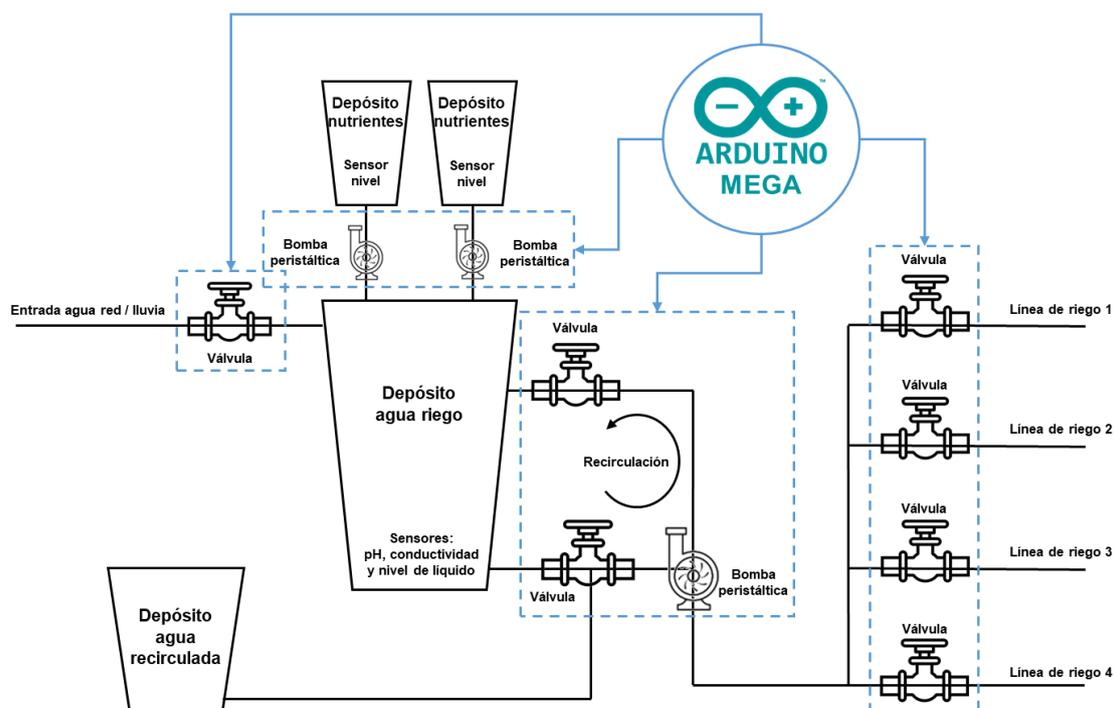
El primer sensor mide la concentración de CO₂ en el aire con un rango de detección de 350 a 10.000 ppm. Además, dispone de una alta estabilidad y repetibilidad y de una baja dependencia a la temperatura y la humedad. El segundo toma medidas de la humedad relativa ambiental con un error máximo de $\pm 1,5\%$ RH y permite trabajar en el rango 0% RH a + 100% RH.

El tercer sensor es el de medida de la temperatura, con error máximo de $\pm 0,1$ °C y rango de medición de -40 °C a +125 °C. El cuarto de ellos corresponde al sensor de medida de la radiación ultravioleta cuyo espectro de respuesta va de los 200 nm a los 370 nm.

5. Ajuste de la calidad del agua

En la Figura 4 se proporciona el esquema de los elementos que se utilizan para ajustar la calidad del agua y proporcionar la cantidad necesaria de riego a los cultivos. Como ha sido mencionado anteriormente, estos elementos de riego están conectados a una placa Arduino MEGA® que los controla.

Figura 4: Esquema de los elementos de riego



En el centro del conjunto se sitúa un depósito en el cual se almacena y se trata el agua procedente de tres orígenes: de la red de agua potable, de la lluvia y de la recirculación. En

este último caso, existe un sistema destinado a recoger el agua que lixivian los cultivos para posteriormente almacenarla en un depósito específico que alimenta al principal.

Por otro lado, el depósito principal dispone de sensores de pH, conductividad y nivel de líquido para medir la calidad y la cantidad del agua que almacena. En caso de que la calidad no sea adecuada, se inyectan nutrientes mediante un sistema de bombas peristálticas. Este tipo de bombas es capaz de hacer circular de forma muy precisa la cuantía necesaria de nutrientes para conseguir el pH y la conductividad deseados.

Asimismo, este depósito dispone de un circuito de recirculación para asegurar que el mezclado sea homogéneo y, en consecuencia, la calidad del agua también lo sea. Finalmente, otra bomba peristáltica se encarga de enviar el agua a diferentes líneas de cultivos, cada una de ellas con una válvula para abrirla y cerrarla.

6. Interfaz de usuario

En la Figura 5 se puede ver el aspecto del primer prototipo del sistema con la pantalla táctil que se le ha añadido para que el usuario pueda interactuar con él. Detrás de ella y oculta en la imagen se sitúa la placa Raspberry Pi ® que se encarga de gestionar los principales elementos que lo conforman. La pantalla es un modelo comercial diseñado para ser utilizado específicamente con este dispositivo, de forma que se evitan posibles problemas de compatibilidad de software y/o hardware.

En la imagen también se observa el Arduino MEGA ® encargado de controlar las bombas, válvulas y sensores que intervienen en el ajuste de la cantidad y calidad del agua para regar. Asimismo, también aparecen otros dispositivos auxiliares eléctricos y electrónicos que sirven para complementar el sistema pero que no son objeto de estudio en este trabajo.

Figura 5: Aspecto del primer prototipo del sistema



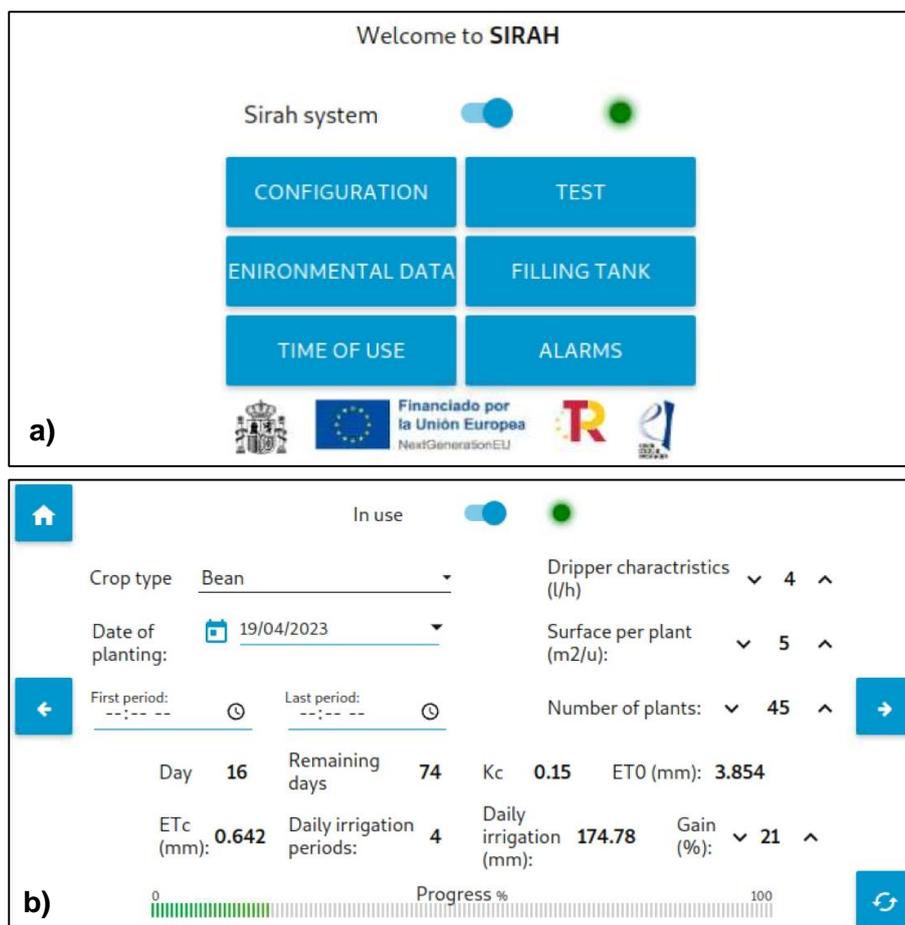
Al tratarse de un primer prototipo, no se ha realizado un trabajo de integración física de cableado y placas. Sin embargo, para la siguiente versión está planteado el diseño específico de placas de circuito impreso PCB para así aumentar la robustez del conjunto, reducir su

tamaño y mejorar su aspecto visual. En los últimos años, el coste de fabricación de estos circuitos se ha reducido significativamente a la vez que se ha disparado su disponibilidad y uso. En consecuencia, no se espera que la integración de una o varias PCBs le haga perder al sistema sus características de bajo coste.

En cuanto la interfaz de usuario, en las Figuras 6.a y b se muestra, respectivamente, el aspecto del menú principal y el de la pantalla con los datos de riego de un cultivo. En cuanto al primero, dispone de un botón de activación del sistema con una luz que indica si está funcionando (color verde) o no (color rojo). Además, también agrupa otros seis botones que sirven para desplegar una serie de menús para configurar los cultivos, realizar un test del sistema de riego, visualizar los datos de los sensores medioambientales, rellenar el tanque de agua, controlar el tiempo de uso del sistema y definir alarmas.

Por lo que respecta a la pantalla de datos de riego, aparecen variables como la tipología de cultivo, el número de plantas, la fecha en la que han sido cultivadas, los días que han pasado desde dicha fecha y los que restan para realizar su recolección, la cantidad de agua irrigada cada día, entre otros. De esta manera, se puede llevar un seguimiento conjunto de la información más importante de forma cómoda, ya que es necesario abrir más de una ventana simultáneamente.

Figura 6: Interfaz de usuario: (a) menú principal y (b) datos de riego



9. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una solución tecnológica de bajo coste para la gestión y monitorización de cultivos de invernaderos en entornos urbanos. El sistema incorpora unos

modelos que permiten maximizar el crecimiento de las plantas, adaptándose a sus necesidades y reduciendo el consumo de agua y energía. Para ello, se realiza un proceso de riego que se controla de forma autónoma a través sensores, bombas y válvulas y el cual proporciona el agua necesaria con la calidad óptima.

Por otro lado, el sistema incorpora una pantalla táctil para facilitar su funcionamiento. Ésta permite a los usuarios introducir la información de los cultivos (tipología y fecha de plantación), visualizar los datos obtenidos y controlar manualmente los principales elementos de riego. El resultado obtenido supone un paso hacia adelante para la generalización del uso de la agricultura urbana destinada a una producción agrícola de alta calidad y bajo una sostenibilidad mayor que la de los sistemas existentes.

Referencias bibliográficas

- Bianchini, G., Casini, M., Pepe, D., Vicino, A., & Zanvettor, G. G. (2019). An integrated model predictive control approach for optimal HVAC and energy storage operation in large-scale buildings. *Applied Energy*, 240, 327-340.
- Fertilecity (2022). Obtenido el 18 de abril de 2022, desde <https://www.fertilecity.com/fertilecity-ii-ca/>
- Müller, A., & Sukhdev, P. (2018). Measuring what matters in agriculture and food systems: A synthesis of the results and recommendations of TEEB for agriculture and food's scientific and economic foundations report. UN Environment, Geneva, Switzerland.
- Muñoz-Liesa, J., Toboso-Chavero, S., Beltran, A. M., Cuerva, E., Gallo, E., Gassó-Domingo, S., & Josa, A. (2021). Building-integrated agriculture: Are we shifting environmental impacts? An environmental assessment and structural improvement of urban greenhouses. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105526.
- Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013). Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for sustainable development*, 33, 695-720.
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., & Klirs, C. (2019). Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050. World Resources Institute, Washington.
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., ... & Dierich, A. (2014). Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and human values*, 31, 33-51.
- Ventura, S., Badia, A., Segura, R., Gilabert, J., Llasat, C., Martilli, A., & Villalba, G. (2021, April). Assessing heat wave mitigation strategies in a Mediterranean coastal city: how effective are cool roofs and urban green?. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-12682).

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

