

Diseño y fabricación PCB de un sistema de control para agricultura vertical a pequeña escala

Stanimir Hristov Hristov¹, Sergio Cuenca-Asensi² y Antonio Martínez-Álvarez²

Resumen—Este artículo presenta el diseño completo y la fabricación en PCB de un sistema, diseñado desde cero, que incorpora las funciones básicas necesarias para poder cultivar vegetales en disposición vertical y un ambiente aislado y controlado. Se muestra en detalle tanto el diseño *hardware* como el *software* del sistema. El diseño se ha llevado a cabo exclusivamente empleando software libre: para el diseño del *hardware* se ha usado la herramienta KiCAD y para el *software* el IDE STM32Cube, de STMicroelectronics.

Palabras clave— Vertical Farming, Plant Factory, PCB, STM32, KiCad, Custom Hardware.

I. INTRODUCCIÓN.

LA agricultura vertical, o también más comúnmente conocida en Asia como *Plant Factory*, es una técnica de cultivo que rompe con la agricultura tradicional, ya que los cultivos se suelen realizar en ambientes cerrados sin suelo ni luz natural, además de realizarse en varios niveles.

En la actualidad son muchas las empresas que se dedican a investigar este campo. Las dos empresas con la tecnología más avanzada en este aspecto y que se encuentran produciendo alimentos usando agricultura vertical son Plenty[1], de EE.UU. y Mirai[2], de Japón. Estas empresas utilizan miles de metros cuadrados de superficie de cultivo, aunque también existen empresas que pretenden utilizar *vertical farming* a menor escala como por ejemplo Freight Farms[3], de EE.UU., que utiliza contenedores marítimos de transporte como depósitos para el cultivo.

Reduciendo más aún la escala de la plantación, encontramos empresas como GreenFarms[4], de Japón, que vende productos dentro del conocido como *Urban Farming*, que consiste en cultivar vegetales para uso particular en un ambiente urbano o doméstico. Este tipo de dispositivos reciben el nombre de *growbox*, y con éste mismo término nos referiremos al sistema desarrollado en este trabajo.



Fig. 1: Ejemplo de agricultura vertical urbana de Green Farms

Por otra parte, los avances en la impresión 3D, la posibilidad de pedir PCB a fabricantes internacionales por un precio bajo y el fácil acceso a componentes electrónicos hacen posible el diseño a pequeña escala de sistemas de control propio para realizar *vertical farming* con una configuración análoga a la mostrada en la fig. 1.

En este trabajo se ha diseñado un sistema, implementado en una placa de circuito impreso o PCB, que pretende controlar las variables ambientales para el crecimiento de vegetales en un espacio cerrado y aislado del exterior. Para conseguirlo se han usado herramientas *open source*. En concreto, se ha usado Kicad para el diseño del PCB y los microcontroladores STM32 de STMicroelectronics y su entorno de desarrollo *open source* STM32Cube para la lógica del sistema. Además se ha escogido FreeRTOS como sistema operativo de soporte.

El resto del trabajo se articula de la siguiente forma: en la sección II se exponen los requisitos del sistema. La sección III presenta todo el *hardware* empleado (placa, sensores, microcontroladores, etc.). La sección IV presenta la arquitectura *software* escogida y la sección V analiza las conclusiones del trabajo.

II. REQUISITOS DEL SISTEMA.

Para el cultivo exitoso de un vegetal se requiere controlar, al menos, los siguientes elementos: luz, temperatura, cantidad y tipo de nutrientes, humedad, concentración de CO₂ y movimiento del aire.

Luz.

Todo vegetal que realiza la fotosíntesis requiere luz solar para vivir, sin embargo, no todo el espectro lumínico se absorbe de la misma forma[5]. Además, dependiendo de la especie vegetal, se debe considerar una cantidad de luz óptima durante un periodo de tiempo específico para optimizar el crecimiento. Adicionalmente la cantidad de luz que la planta puede absorber esta ligada a la cantidad de CO₂ en el ambiente [6]. En este trabajo se han empleado diodos LED rojos y azules, ya que la combinación de estas dos longitudes de onda es una solución general en la mayoría de granjas verticales comerciales [7] para optimizar la absorción de energía.

Temperatura.

Para el óptimo crecimiento vegetal el valor de este parámetro no debe ser excesivamente cálido o frío. Los valores extremos son específicos para cada es-

¹Universidad de Alicante, e-mail: shh10@cloud.ua.es

²Dpto. de Tecnología Informática y Computación, Universidad de Alicante, e-mail: {amartinez,sergio}@dtic.ua.es

pecie vegetal. En este proyecto se propone utilizar módulos *Peltier* para regular la temperatura.

Nutrientes.

Los vegetales que realizan la fotosíntesis requieren nutrientes para poder realizar sus funciones vitales. Los nutrientes son iones que usa la planta para poder mover por su estructura los resultados de las reacciones químicas derivadas de la fotosíntesis. Las plantas complejas comúnmente usadas en la agricultura humana requieren de hasta 17 nutrientes distintos [8]. En la agricultura vertical casi siempre se usa hidroponía o cultivo de plantas en soluciones acuosas. Estas soluciones líquidas se pueden comprar sin dificultad a través de portales de comercio electrónico generalista.[9]

A pesar de esto, las soluciones tienen que ser administradas manualmente y repuestas en periodos adecuados. En este trabajo no se ha considerado automatizar este proceso ni el control de acidez de la solución.

Humedad.

Para la supervivencia de la mayoría de plantas de cultivo es necesario que la humedad ambiental este entre ciertos valores. Si la humedad ambiente baja de un límite determinado esto puede provocar deshidratación y en consecuencia la muerte de la planta. [10]. En este proyecto no se ha considerado el control de la humedad.

Dióxido de carbono.

El nivel de CO_2 es crítico para el crecimiento de la planta, ya que sin él no sería posible realizar la fotosíntesis. En un ambiente cerrado es necesario aportarlo de manera artificial. En este proyecto se ha usado una bombona de CO_2 .

Movimiento del aire.

Para fomentar el intercambio de gases entre el medio ambiente y la planta se recomienda un flujo con velocidades entre 0.5m/s y 1m/s. Los valores inferiores reducen el intercambio de gases y en consecuencia el crecimiento de la planta. Los valores superiores provocan estrés mecánico en la planta y no aumentan el ritmo de intercambio de gases [11].

En el trabajo que se presenta en este artículo, se ha optado por controlar los parámetros más importantes en el crecimiento de una especie vegetal: la luz, la temperatura y el movimiento del aire.

III. DISEÑO DEL HARDWARE.

Para integrar el control de los parámetros de interés citados en la sección anterior, se propone el diseño de una placa de circuito impreso que integre toda la electrónica de control necesaria para el funcionamiento del sistema.

Nuestra elección se basa en un microcontrolador de la familia STM32F303 de STMicroelectronics, que integra sensores de temperatura, humedad, presión y nivel CO_2 . Se ha usado el software KiCAD para

desarrollar la placa de circuito impreso (PCB) que mostramos en las figuras 2 (renderizado que proporciona la herramienta), 3 (Placa física sin montar) y 4 (Montaje final de la placa).



Fig. 2: Renderizado del diseño en KiCad.

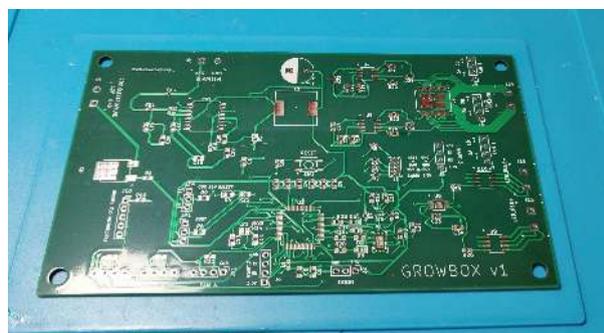


Fig. 3: PCB según se recibió del fabricante.



Fig. 4: PCB Con todos los componentes soldados

Se trata de una PCB de 4 capas con dimensiones 134mm×78mm. Las 2 capas externas se encargan de unir los componentes que están en la superficie, mientras que las capas internas se emplean como tensión de alimentación (VCC) y masa (GND). La tensión de alimentación es de 12V, que se convierten a 3.3V mediante un convertidor DC-DC *step-down*, que puede proporcionar hasta 1.5 amperios para alimentar la placa y los sensores; el resto de componentes funcionan a 12V. Procedemos a presentar cada una de las funciones de la placa por separado.

A. Control de temperatura: módulos *Peltier* y puente H.

EL control de temperatura se ha realizado mediante el uso de módulos *Peltier* y un Puente H de MOSFETs.

Módulo *Peltier*.

Un módulo *Peltier* es un dispositivo termoeléctrico que con el paso de una corriente continua calienta uno de sus extremos y el otro se refrigera (ver Fig. 5).

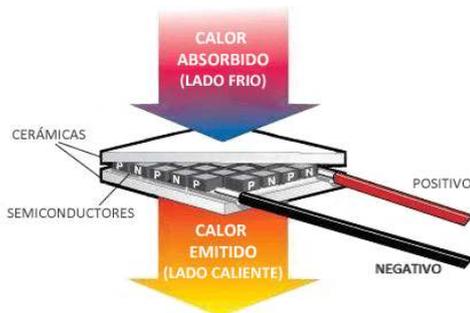


Fig. 5: Esquema del funcionamiento de un módulo *Peltier*.

Si se invierte la polaridad, el efecto térmico en los lados también lo hace, es decir, el lado que se calienta se refrigera y viceversa. Este tipo de dispositivos es muy versátil y de bajo coste, pero su principal desventaja es la eficiencia eléctrica y la implementación práctica, ya que un módulo *Peltier* sin un disipador de calor no puede funcionar de manera continua. Esto es debido a que el lado caliente empieza a transferir calor al lado frío, lo que provoca que el módulo deje de funcionar. Debido a esto, las implementaciones prácticas, como la usada en este proyecto, suelen colocar el módulo *Peltier* en medio de 2 disipadores de calor.

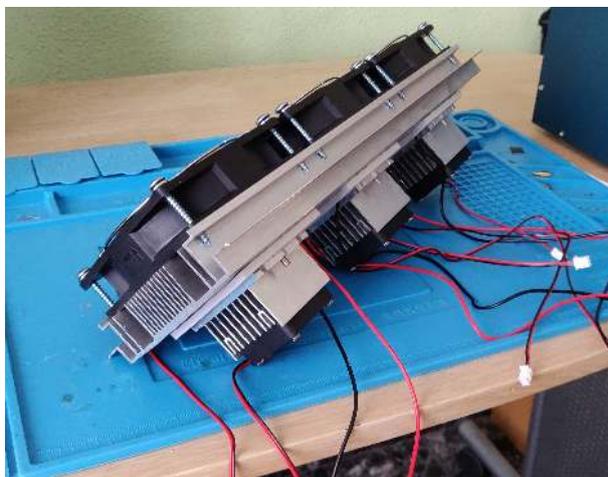


Fig. 6: Imagen del dispositivo *Peltier* comercial.

En la Fig. 6 se puede ver el dispositivo usado. Este dispositivo contiene 3 módulos *Peltier* del tipo 12705, que funcionan a 12V y hasta una intensidad máxima de 5A cada uno. En total el dispositivo puede absorber hasta 180W de potencia, pero debido a la baja eficiencia del módulo *Peltier*, sólo entre el 10-15% se emplea en refrigeración efectiva[12].

Puente H.

Se ha decidido usar un puente H de MOSFETs, como los usados en el control de motores eléctricos DC, para lograr la inversión en el módulo *Peltier*. Esta técnica es sencilla pero, no obstante, es poco

eficiente, y reduce aún más la eficiencia del módulo *Peltier*. En concreto el uso de PWM (Pulse-Width Modulation) respecto al uso de corriente continua es un 39,5% menos eficiente, pero no provoca degradación en el módulo a largo plazo[13].

Para el puente H se ha usado el integrado *VNH9013YTR* de STMicroelectronics, capaz de soportar hasta 40A. Para mover cada uno de los lados del puente se han usado dos integrados *2ED21091S06F* de Infineon. Este IC (circuito integrado) es un Driver MOSFET de medio puente. El uso de este tipo de IC simplifica mucho el trabajo con puentes H de MOSFETs del tipo N, ya que en la parte alta debe haber una tensión mayor que la de la línea para poder actuar la puerta. Al utilizar estos IC podemos incorporar un condensador que hace la función de *bootstrap*. La descarga rápida de este condensador permite elevar el voltaje del lado alto por encima de la línea de alimentación y así poder actuar la compuerta para que el MOSFET entre en conducción. La elección del valor del condensador de *bootstrap* es crítico, ya que a medida que aumenta la frecuencia de la señal PWM, el condensador tiene menos tiempo entre carga y descarga y si la frecuencia es excesivamente alta, el puente H puede dejar de funcionar. En este caso, para una frecuencia de 25kHz, se ha usado el valor 4.7µF recomendado por el fabricante para la mayoría de aplicaciones.

La potencia máxima con la que el sistema de control de temperatura puede trabajar viene limitada por el ancho de las líneas en la PCB. En este caso, y según las limitaciones del *layout* de la PCB y el IC, las líneas han sido de 3mm de anchura y de 34.80µm de grosor. Considerando un incremento de temperatura de 40C, esto nos limitaría a 9,72A como máximo. En las opciones del fabricante de la PCB se daba la opción de duplicar el grosor de la línea, pero se ha considerado innecesario ya que en un control continuo, una vez se establezca el equilibrio, no es necesario añadir grandes cantidades de energía para mantener la temperatura.

B. Control de la iluminación LED.

Para simular la iluminación LED de la *growbox* se han diseñados estas sencillas PCB para el proyecto (ver Fig. 7). Constan de 3 LEDs por PCB. 3 LEDs rojos y 3 LEDs azules de alta potencia específicos para horticultura. En concreto se trata de los modelos XPGDPR-L1-0000-00F01 (LED rojo) y XPGDRY-L1-0000-00601 (LED azul).

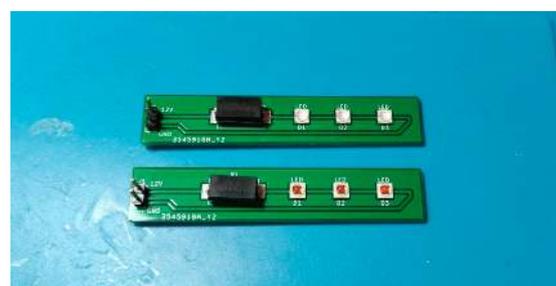


Fig. 7: PCB diseñadas para simular la iluminación LED.

Se ha diseñado para que funcionen a 200mA y cada LED tenga un *forward voltage* de 2.3V. Además al ser alimentadas a 12V y usar solo 3 LEDs, se ha añadido una resistencia de potencia donde cae el resto de tensión.

Para el control de la iluminación LED se ha usado una estrategia parecida al control de temperatura pero más sencilla. En este caso los MOSFETs se encuentran entre la PCB de LEDs y tierra. Esto elimina la necesidad de que el voltaje que actúe sobre la puerta del MOSFET esté por encima de la tensión de alimentación, como sucedía en el control de temperatura. Aún así, en aplicaciones PWM se pueden producir capacitancias parásitas producidas por los MOSFETs que pueden provocar corrientes que atraviesen el MCU y dañarlo. Para evitar esto se ha usado el IC *LM5111-1MY* de Texas Instruments. Los MOSFETs usados para los LEDs son *SI4178DY-T1-GE3* de Vishay Siliconix.

C. Control de la velocidad del aire.

Como se mencionó en los requisitos del sistema, para el correcto crecimiento de un vegetal se necesita un movimiento de gases en el ambiente. Esto se consigue mediante 3 ventiladores como los de la Fig. 8. Son ventiladores de PC estándar de 4 pines e internamente son motores DC sin escobillas.



Fig. 8: Ventilador de PC usado para mover el aire.

D. Sensores.

Se han usado dos sensores. Para la temperatura se ha usado el sensor *BME280* de Bosch, y para medir y regular el nivel de CO₂ se ha usado el sensor *USEQGSEAC82810* de KEMET.

D.1 Sensor de temperatura.

El sensor *BME280* de Bosch está muy extendido en los bienes de consumo. Además de temperatura, también es capaz de medir humedad y presión. El sensor tiene un rango de medida de -40 a 60 grados centígrados. Sus protocolos de comunicación son I2C y SPI. En este proyecto se ha usado I2C.

D.2 Sensor de CO₂.

El sensor *USEQGSEAC82810* de KEMET es un sensor nuevo (modelo del 2020) que utiliza infrarrojos para medir la concentración de CO₂ en el ambiente. Se comunica mediante I2C y proporciona una

línea que puede notificar al MCU cuándo hay una nueva medida disponible.

E. Sensor de CO₂ alternativo.

También se ha añadido un conector hembra para poder conectar un sensor de CO₂ electrolítico. A diferencia del sensor de CO₂ de infrarrojos, el electrolítico usa una reacción electroquímica en su interior y dependiendo de la cantidad de CO₂ en el ambiente se obtiene una diferencia de potencial u otra.

F. Control del CO₂.

Como se ha mencionado anteriormente, en este proyecto se usa una bombona de CO₂ y una electroválvula. A la bombona de CO₂ se le conecta un manómetro para poder regular el caudal de salida. La salida del manómetro se conecta mediante un tubo de plástico a la entrada de la electroválvula. Se ha usado una electroválvula de *US Solid*, normalmente cerrada, que funciona a 12V y necesita 1,167A para su apertura. Para controlar la electroválvula se ha usado un transistor BJT de canal N en configuración Darlington. Se ha decidido usar este tipo de transistor ya que la activación de la válvula se produce en periodos cortos y es un control de tipo *ON/OFF*.

IV. DISEÑO DEL SOFTWARE.

Proponemos usar el microcontrolador (MCU) *STM32F303RET6* de STMicroelectronics. Se trata de una MCU basada en ARM Cortex-M4 de 32 bits que tiene 512Kb de memoria flash y una frecuencia de reloj hasta 72MHz. Para que el MCU puede alcanzar dicha velocidad y poder escalar el sistema en un futuro, se ha añadido un reloj externo a la PCB. Este micro incorpora además varias interfaces de comunicación entre las cuales se encuentra una interfaz serie tipo USART. En nuestro diseño se usan 2 interfaces de este tipo. La primera se usa para visualización de datos en el PC, mientras que la segunda se conecta a una MCU ESP-32 que provee al sistema de conectividad, de forma que es posible enviar consignas de control a la MCU a través de la red WiFi.

Para el software del proyecto se propone una arquitectura multihilo sobre *FreeRTOS*[14].

En este sentido, las herramientas que proporciona STMicroelectronics, integran *FreeRTOS* bajo la capa de abstracción de ARM llamada *CMSIS-RTOS*[15]. Esta capa es una iniciativa de unos cuantos fabricantes para integrar las funcionalidades de varios RTOS (sistemas operativos de tiempo real) con un mismo *wrapper*. Esto posibilita portabilidad entre diferentes plataformas y diferentes RTOS. A continuación, se detalla cómo se ha planteado la arquitectura software del sistema.

A. Hilos presentes en el sistema.

La arquitectura software se ha organizado en los siguientes hilos concurrentes:

- DefaultTask: Hilo maestro del sistema operativo.

- temp_contr: Hilo de control de la temperatura, que implementa un controlador PID que lee el sensor de temperatura, ejecuta el comando de temperatura actual y genera un valor de *duty cycle* para los módulos *Peltier*. En caso de que el valor sea negativo se invierte la polaridad con la ayuda del puente H y se empieza a refrigerar la caja.
- led_control: Hilo que lee el comando de control actual y asigna una señal PWM que regula el brillo de los LEDs de 0 a 100 %.
- co2_control: Hilo de control del CO₂. En caso de que en la configuración de inicio se haya leído que el GPIOA15 (pin de propósito general que usamos para seleccionar distintos tipos de sensores de CO₂) esta conectado a 3.3V, se procede a leer el sensor de CO₂ electrolítico mediante el ADC (convertidor analógico digital integrado en el microcontrolador) según los intervalos proporcionados por el *timer* del propio ADC. Si el contenido de CO₂ medido esta por debajo de la consigna, la electroválvula estará en posición abierta hasta la siguiente reejecución del hilo donde se comprueba la concentración y se compara con la consigna. Cuando la concentración alcance o sobrepase la concentración deseada, se reduce la consigna de control. Esto evita que la electroválvula esté alternando entre abierta y cerrada de manera continua. En caso de que se elija usar el sensor infrarrojo, conectando GPIOA15 a masa, el sensor CO₂ infrarrojo genera una interrupción cada vez que se dispone de una medida nueva. Esta interrupción despierta el hilo co2_control y si la concentración es menor que la consigna, la electroválvula permanece abierta hasta que la siguiente interrupción despierte el hilo y se realice otra medida. Cuando se alcanza la consigna, ésta se reduce.
- fan_control: Hilo que lee y controla la velocidad de los ventiladores. El diseño contempla el uso de hasta 3 ventiladores. Cada revolución completa de un ventilador, genera 2 pulsos de tacómetro. A una velocidad máxima de aproximadamente 1800RPM, estaríamos generando un total de 10800 pulsos por minuto. Esta cantidad, si se usaran interrupciones convencionales, perjudicaría negativamente el funcionamiento del sistema. Para evitar este problema, se ha usado el DMA (acceso directo a memoria) y el modo *Capture-Compare* del microcontrolador. Este modo hace que el *timer* sea independiente del microcontrolador y cuando se detecten 2 pulsos de tacómetro, se genere una interrupción. Esta interrupción no genera un cambio de contexto, sino que activa el DMA y mueve a una dirección de memoria predefinida el valor del *timer* en ese instante. El hilo realiza la misma operación de manera continua sobre las dirección destino del DMA. Así pues, en un momento cualquiera el valor de esa dirección de memoria puede contener un valor distinto y generar otro valor de

RPM.

Para el control de la velocidad deseada del ventilador se varía el *duty cycle* del pin de control de velocidad de cada uno de los ventiladores. Existe no obstante el problema de que el control de velocidad no sea lineal respecto al *duty cycle*. Es por esto que para poder controlar la velocidad el ventilador es necesario extraer datos experimentales del mismo. Esto se consigue obteniendo una gráfica que relacione *textitduty cycle* y RPM. Después, se hace un ajuste polinómico a los datos obtenidos y se obtiene la ecuación que relaciona RPM y *duty cycle*.

- usart_com: Hilo que se despierta al generarse una interrupción en la línea RX del USART3. En este caso, se lee el mensaje que hay en el *buffer* y se descompone. Los mensajes que llegan tiene una estructura formada por 2 partes. Por ejemplo para establecer la consigna de control de temperatura a 22 grados centígrados, el mensaje que llegaría a la PCB sería *TEMP#22*. El hilo primero encuentra el carácter divisor preestablecido, en este caso *#* y divide el mensaje en 2 partes. La primera parte indica a qué variable de control se debe asignar y la segunda indica el valor.
- usart_out: Este hilo, que siempre esta activo, se encarga de enviar al exterior la lectura de los sensores del sistema utilizando estructuras de datos explicadas con más detalle en el siguiente apartado.

B. Técnicas de coordinación de los hilos.

Para la coordinación de los hilos se han usado colas y también la técnica de exclusión mutua (*mutex*).

El sistema usa las siguientes colas:

- CO2_queue: almacena los datos leídos del sensor de CO₂.
- temp_queue: almacena la temperatura leída del sensor BME280.
- hum_queue: almacena la humedad leída del sensor BME280.
- pres_queue: almacena la presión leída del del sensor BME280.
- fan_speed_queue: almacena la velocidad de los 3 ventiladores en un tipo de dato específico.

Se han usado los siguientes *mutex*: fan_speed_mux, led_mux, temperature_mux y co2_mux.

El sistema consta de variables globales que almacenan la consigna actual de control y sirven para mantener la información entre los hilos de control y el hilo usart_com. Existe una variable de este tipo por cada *mutex* en el sistema.

Cuando se recibe un comando, el hilo usart_com lo fragmenta. Una vez establecido qué comando es y dónde hay que asignar el valor, se intenta capturar el *emphmutex* que protege la variable global correspondiente. En el hilo usart_com el tiempo de espera es 200ms, que es más que suficiente para que este hilo pueda capturar el *mutex* y asignarle un valor a la

variable global que corresponda. El tiempo de espera es suficiente para evitar perder órdenes. Los hilos de control constantemente intentan capturar el *mutex* de sus respectivas variables. Con el *mutex* capturado, la variable global correspondiente se asigna a una variable local del hilo y así se lleva al sistema al valor objetivo.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este artículo presenta el diseño hardware y software, así como la fabricación en PCB de un sistema, basado en microcontrolador, para controlar las funciones básicas necesarias para poder cultivar vegetales en disposición vertical bajo un ambiente aislado y controlado. El diseño, que se ha llevado a cabo exclusivamente empleando software libre, muestra la viabilidad de la implementación personalizada de este tipo de sistemas. Aunque se controla únicamente las variables ambientales de nivel de CO₂, temperatura, iluminación y velocidad del aire, el diseño software (apoyándonos en el sistema operativo) y hardware permite el escalado fácil al resto de parámetros de interés que se han descrito en el artículo.

Con respecto a las posibilidades de escalado del sistema, se propone integrar el control del resto de parámetros. Por ejemplo, en la medición de los iones (nutrientes), existen sondas específicas^[16] que son capaces de medir la concentración de un ion específico dentro de la solución hidrópica. Esto permitiría encontrar relaciones causa-efecto entre particularidades morfológicas en el crecimiento de la planta y la cantidad y/o ritmo de absorción de un ion en concreto. Este tipo de sondas trabajan con software y hardware propietario y sería necesario modificaciones en su diseño para integrarlo en la placa.

Para el control de la acidez de la solución hidrópica², se podría usar una sonda de pH más potente y versátil, en concreto la *LMP91200*, de *Texas Instruments*. Para el control de humedad se propone usar el dispositivo de módulos *Peltier* con un depósito de drenaje para la condensación o utilizar una bomba de calor como las utilizadas en los frigoríficos para refrigerar planchas metálicas y producir condensación que después pueda ser capturada en depósitos. Para el caso de necesitar aumentar la humedad, se podría utilizar un depósito de agua con un elemento que se caliente y que provoque evaporación. Para aumentar el contenido de CO₂ en la caja se podría utilizar un sistema de combustión que genere CO₂. Esto sería posible usando un combustible limpio como el gas natural o el etanol.

Respecto a posibles mejoras en el hardware, proponemos incorporar un microcontrolador como el ESP-32, que incorpore conectividad WiFi y que proporcione hardware y bibliotecas para poder conectar una pantalla que muestre las variables del sistema o dar avisos a un bot de *Telegram*.

²Desde un punto de vista científico la acidez es la concentración de iones de hidrógeno, H⁺, así pues, estrictamente hablando, se trata de un ion más dentro de los nutrientes de una planta

REFERENCIAS

- [1] "Plenty," <https://www.plenty.ag/>, Accessed: 21-05-2021.
- [2] "Mirai," <https://miraigroup.jp/en/>, Accessed: 21-05-2021.
- [3] "Freight farms," <https://www.freightfarms.com/>, Accessed: 21-05-2021.
- [4] "Green farms," <https://greensfarms.jp/>, Accessed: 2021-05-2021.
- [5] Genhua Niu Haijie Dou, *Plant responses to light*, pp. 153–163, Elsevier Academic Press, 2016.
- [6] Yoo Park, Jieun Park, Seung Hwang, and Byoung Jeong, "Light source and co2 concentration affect growth and anthocyanin content of lettuce under controlled environment," *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, vol. 53, 12 2013.
- [7] Fatemeh Sheibani Cary A. Mitchell, *LED advancements for plant-factory artificial lighting*, Elsevier Academic Press, 2016.
- [8] E Epstein, "The anomaly of silicon in plant biology," *Proc Natl Acad Sci U S A.*, vol. 91, no. 1, pp. 11–17, 1994.
- [9] "Líquido nutritivo para plantas," <https://generalhydroponics.com/>, Accessed: 21-05-2021.
- [10] D. A. GRANTZ, "Plant response to humidity," *Plant, Cell & Environment*, no. 1, pp. 667–679, 1990.
- [11] Yoshiaki Kitaya, Toshio Shibuya, T. Kozai, and C Kubota, "Effects of light intensity and air velocity on air temperature, water vapor pressure, and co2 concentration inside a plant canopy under an artificial lighting condition," *Life support & biosphere science : international journal of earth space*, vol. 5, pp. 199–203, 02 1998.
- [12] D.R. Brown, T.B. Stout, J.A. Dirks, and N. Fernandez, "The prospects of alternatives to vapor compression technology for space cooling and food refrigeration applications," *Energy Engineering*, vol. 109, no. 6, pp. 7–20, 2012.
- [13] FlorentMuret Olivier Mellin, "Driving a peltier element(tec): Efficiency and aging," 2020.
- [14] "Freertos," <https://www.freertos.org/>, Accessed: 2021-05-2021.
- [15] "Cmsis," https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/RTOS2/html/group__CMSIS__RTOS.html, Accessed: 2021-05-2021.
- [16] "Sondas de medición de iones," <https://www.ntsensors.com/products/multi-ion-probe/>, Accessed: 2021-05-2021.