

Diseño e implementación de un control de pH, conductividad y monitoreo del nivel de agua para el cuidado cultivos hidropónicos de uso doméstico

A. Amaya, L. Cruz

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Resumen – En este artículo se detallan las etapas para el diseño e implementación de un control de pH y conductividad para el cuidado automatizado de cultivos hidropónicos de uso doméstico. Se describen las soluciones de hardware y software adoptadas en la consecución del control deseado, a fin de mantener condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos hidropónicos, con una intervención mínima del usuario. Lo anterior manteniendo criterios de bajo costo en la implementación a fin de obtenerse un producto que sea asequible al usuario final.

Palabras clave – Arduino, Cultivo Hidropónico, electroconductividad, pH, temperatura.

Abstract – In this article, the steps for the design and implementation of a pH and conductivity control for automated care of household hydroponics crops are detailed. It describes the hardware and software solutions adopted for achieving the desired control in order to maintain optimal conditions for the growth of hydroponic crops, with minimal user intervention. The above while maintaining low cost implementation criteria in order to obtain a product that is affordable to the end user.

Este trabajo ha sido apoyado por la empresa PAQUA, la cual comercializa cultivos hidropónicos en diferentes ciudades en Colombia.

Los autores presentan este artículo como trabajo de grado al título académico de Especialista en Informática y Automática Industrial, en la Universidad Francisco José de Caldas, sede Bogotá, Colombia.

I. INTRODUCCIÓN

Paquí, un proyecto de jóvenes emprendedores colombianos, actualmente ofrece a la comunidad sistemas de cultivos hidropónicos no automatizados, que requieren la intervención permanente de un funcionario para medir las variables del proceso, y realizar el control a través de la dosificación manual de nutrientes.

Mediante la automatización del cuidado de las plantas en las variables críticas que inciden en su desarrollo, se pretende garantizar que se mantengan las condiciones óptimas para su crecimiento y a la vez se reduzca al máximo la intervención humana.

Esto permite que los usuarios con conocimientos avanzados, así como aquellos que apenas inician en la hidroponía y sólo se interesan en obtener productos para el consumo, puedan tener en sus hogares cultivos altamente eficientes con bajos costos de mantenimiento.

Actualmente Paquí debe disponer de personal para visitar periódicamente cada cultivo, lo que se traduce en un elevado costo de operación para la empresa y por otra parte puede resultar incómodo para el cliente. Al contar con un sistema de control automático, Paquí puede reducir significativamente sus costos directos de operación y sus clientes ganar libertad al no tener que recibir periódicamente las visitas del funcionario.

Por otra parte, el monitoreo más frecuente de los niveles de pH, conductividad y nivel de agua, junto con la ejecución de acciones de control inmediatas, contribuyen a mantener un entorno saludable para las plantas promoviendo un adecuado crecimiento y desarrollo.

El uso de componentes de bajo costo constituye una premisa a nivel de diseño dado que lo que se pretende es

precisamente reducir el costo de operación y evitar un incremento significativo en el costo para el usuario final.

II. OBJETIVOS

De acuerdo a la necesidad evidenciada, el objetivo principal del proyecto consiste en diseñar e implementar un control de pH, conductividad y monitoreo del nivel de agua de bajo costo para el cuidado de cultivos hidropónicos de uso doméstico.

Para la consecución del objetivo principal, se plantearon los siguientes objetivos específicos para llevar a cabo la solución al problema planteado:

- 1) Identificar los componentes necesarios para realizar el control y monitoreo del pH, conductividad y nivel de agua en un cultivo hidropónico.
- 2) Diseñar y programar un sistema de monitoreo y control a los parámetros de pH, conductividad y nivel de agua.
- 3) Implementar un prototipo funcional que permita realizar el monitoreo y control en un cultivo hidropónico de pequeño tamaño.

III. MARCO TEÓRICO

A. Hidroponía

La hidroponía¹, es una técnica de cultivo en la que puede prescindirse del suelo mediante el uso de otros materiales para dar soporte físico a la estructura de las plantas, y de sistemas alternativos para garantizar el suministro de agua, oxígeno y nutrientes. La hidroponía permite diseñar estructuras simples y/o complejas favoreciendo las condiciones ambientales idóneas para producir cualquier planta de tipo herbáceo, aprovechando en su totalidad cualquier área (azoteas, jardines, suelos infértiles, terrenos escabrosos, etc.) sin importar las dimensiones ni el estado físico de éstas. Aunque la hidroponía es trabajo en agua también utiliza medios y/o estructuras para anclar y sostener a la planta.

En algunos casos, el término "hidroponía" es usado sólo para describir sistemas basados en agua, pero en el sentido más amplio, el término es el de cultivo sin suelo. [1]

Típicamente, los nutrientes en proporciones específicas para cada especie, son disueltos en agua y se hacen circular de modo que entren en contacto directo

con las raíces de las plantas para ser absorbidos. Con base en el tipo de riego, los hidropónicos pueden dividirse en sistemas abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos, la solución nutritiva es desechada después de hacer su recorrido a través del cultivo, mientras que en los sistemas cerrados se recoge y se hace recircular con mecanismos de bombeo. Aquí es cuando se hace necesario un control frecuente de la solución nutritiva; puesto que las plantas van alterando su composición inicial y al cabo de un tiempo estaremos recirculando una solución que quizás sea inadecuada. [1]

Al administrar los nutrientes a través de una solución que es absorbida directamente por las raíces de las plantas, es posible reducir considerablemente su desperdicio y a la vez los niveles de contaminación del ambiente.

En la medida en que la agricultura deja de depender de la disponibilidad de suelos arables, esta puede ser practicada casi en cualquier entorno incluso en áreas desérticas y zonas urbanas, siempre y cuando sea posible mantener las condiciones de riego.

La hidroponía es útil, porque da la posibilidad de incrementar la productividad a índices generalmente más altos que la de cultivos de suelo, y se convierte en una alternativa cuando éste presenta problemas físicos, químicos o biológicos. [2]

Por ejemplo, el control de plagas e infecciones resulta mucho más simple en sistemas hidropónicos que en los cultivos en suelo. Sin embargo, la hidroponía demanda una alta inversión en infraestructura y adecuación, y requiere mayores conocimientos por parte del personal técnico que maneja el sistema. [2] Por otra parte, la mayoría de sistemas de cultivo hidropónicos/sin suelo no son fáciles de manejar por personal sin experiencia o habilidades. [3]

A pesar de que en nuestro país el concepto se popularizó hasta la segunda mitad del siglo XX, la hidroponía ha tenido una larga evolución a través del tiempo. Por ejemplo, los antiguos jardines colgantes de Babilonia y los jardines flotantes de los Aztecas en México eran hidropónicos por naturaleza. [3]

Dentro del contexto de la llamada agricultura urbana, la hidroponía puede ser muy bien aplicada en las ciudades con tecnologías más sencillas y de bajo costo, principalmente en zonas de extrema pobreza, como una manera de incentivar el autoconsumo de hortalizas y de apoyar el ingreso familiar a través del autoempleo en las propias viviendas o en los centros comunales. [1] Los cultivos hidropónicos sin embargo, no están orientados exclusivamente a los sectores menos favorecidos de la población. Actualmente existe un segmento de estratos medios-altos con una marcada preferencia por los

¹ La palabra Hidroponía se deriva del griego Hydro (agua) y Ponos (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua.

productos agrícolas orgánicos y saludables que ha encontrado en la hidroponía una excelente alternativa. Con la mejora de las condiciones económicas, las nuevas oportunidades han creado una clase media más grande, de personas que pueden permitirse el lujo de exigir verduras frescas de mayor calidad. [4]

En Colombia se han realizado varios trabajos prácticos en el campo de hidroponía, dentro de los cuales se destaca un proyecto liderado por el Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. La Universidad, ejecutó un proyecto en conjunto con la Cooperativa Agroindustrial La Mana en la Sabana de Bogotá que resultó beneficiaria de la convocatoria de Desarrollo Tecnológico del Cultivo de Lechuga, Tomate y Zanahoria de Colciencias en 1998. Para este proyecto, se fabricaron invernaderos de diseño europeo, como el holandés -de vidrio- con adaptaciones climáticas y de automatización, lo cual permite abrirlos y cerrarlos en función de la temperatura y la humedad relativa, y se adquirieron equipos especializados para medición de variables climatológicas: humedad, radiación y velocidad, entre otras. [2]

B. Conductividad Eléctrica (EC)

Una de las variables a considerar en la hidroponía para el cuidado de las plantas es la conductividad eléctrica del agua del cultivo.

Cuanto más elevada sea la concentración de sales disueltas, mayor será la conductividad eléctrica, por lo que si ésta se eleva excesivamente, la planta puede sufrir déficit hídrico, semejante al que se produce en condiciones de sequía. [1]

La conductividad eléctrica refleja la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica, y está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas y con la cantidad Total de Sólidos Disueltos (TDS), es decir principalmente sales minerales.

Ya que la medición directa de la cantidad Total de Sólidos Disueltos en una solución es un proceso bastante dispendioso, se emplea la conductividad eléctrica como un referente bastante aproximado.

1) *El Efecto de la Conductividad Eléctrica en las Plantas*

La conductividad eléctrica en realidad ofrece información sobre el nivel de salinidad. Altos niveles de salinidad pueden afectar a las plantas en varias formas:

1. La toxicidad específica de un ion particular (como el sodio)

2. La presión osmótica más alta alrededor de las raíces previene una absorción eficiente de agua por la planta.

En contraposición, un bajo nivel de salinidad puede indicar que la solución no contiene nutrientes suficientes para la planta.

Algunas especies de plantas son más susceptibles a los efectos de la salinidad que otros.

La conductividad (EC) o TDS (total de sólidos disueltos) puede ser medida a través de un instrumento electrónico que realiza esta función. [5]

Por lo tanto, para el óptimo crecimiento de la planta, se requiere que la conductividad del agua se encuentre en un rango de valores adecuado, ya que un exceso o déficit en esta característica se traduce en afectación de la planta y por ende del cultivo.

2) *Unidades de Medida de la Conductividad Eléctrica del Agua*

Las unidades comúnmente utilizadas para medir la conductividad eléctrica del agua son:

$\mu\text{S/cm}$ (microSiemens/cm) o dS/m (deciSiemens/m)

En donde: $1000 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ dS/m}$

C. *Potencial de Hidrógeno (pH)*

Otra variable importante a considerar en la hidroponía para el cuidado de las plantas es el nivel de pH del agua del cultivo.

El pH o potencial de Hidrógeno se refiere a la concentración de iones de Hidrogeno (H^+), los cuales determinan el grado de acidez o alcalinidad de una solución.

El nivel de pH de la solución afecta las propiedades químicas de las sustancias que la componen, así como las propiedades de las raíces (particularmente, la carga eléctrica alrededor de ellas). La consecuencia es que hay sustancias que son más fáciles de absorber por las raíces a un cierto pH, y otras que requieren un pH diferente para ser absorbidas.

Las plantas asimilan mejor los nutrientes en un rango de entre 5.5 y 6.5. Es fundamental cuidar este punto ya que si los niveles de pH se salen de este rango la planta deja de nutrirse correctamente. [1]

1) *El efecto del pH en las plantas*

En la hidroponía (y en general en cualquier tipo de cultivo), la planta toma los nutrientes que necesita a través de su raíces y los transporta hasta las hojas, en donde son asimilados. Este proceso se ve afectado

cuando el pH no es adecuado, bien sea por encontrarse demasiado alto (básico) o demasiado bajo (ácido), causando estrés a la planta, limitando su crecimiento y por ende bajando la calidad y rendimiento del cultivo.

Se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido a través de la aplicación de soluciones nutritivas ligeramente ácidas. El valor óptimo del pH del sustrato debe estar entre 6.0 y 7.0. [1]

El cuidado adecuado de un cultivo hidropónico implica un monitoreo de los niveles de pH del agua. Las plantas admiten un rango determinado de valores de pH en el agua absorbida, sin embargo, salirse de este rango puede traer consecuencias negativas. Por tanto, cualquier cambio en unidad de pH puede tener un gran efecto en la disponibilidad de iones a las plantas. [4]

2) Unidad de Medida del pH

El pH se define como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno:

$$\text{pH} = -\log_{10} [a_{H^+}]$$

Se presenta en una escala de 1 a 14. Son ácidas las sustancias con pH menores que 7 y alcalinas (o básicas) las de pH superiores a 7. El pH = 7 indica neutralidad de la sustancia.

A continuación se presentan ejemplos de diferentes tipos de sustancias con su respectivo nivel pH:



Figura 1. La escala del pH. Abril de 2015. Recuperado de: http://www.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/phscale.html

D. Control Hidropónico

El cuidado adecuado de un cultivo hidropónico depende de diferentes variables y condiciones del entorno en el cual se desarrollan las plantas. El éxito subyace en lograr mantener los niveles óptimos de cada una de estas condiciones el mayor tiempo posible durante su crecimiento. Son muchas las cosas que puede

hacer un productor para manipular los factores que permitan lograr un fruto u hortaliza de calidad. Estos incluyen la luz, control de humedad, CE, pH, nutrientes, agua, temperatura, hasta el sustrato que se use. [1]

El avance tecnológico, el desarrollo de sensores más robustos y precisos, la reducción de costos en los dispositivos microcontroladores, entre otros aspectos, ha popularizado el uso de controles para los cultivos hidropónicos, desde el monitoreo hasta control de inyección de sustancias. El uso de computadores y control por computadora de prácticamente cada aspecto de una operación hidropónica ha revolucionado la toma de decisión y los procedimientos de control. [3]

En la producción agrícola a gran escala, los sistemas automáticos de control representan un elemento clave para reducir los costos y mantener las condiciones de crecimiento a través del tiempo. A estos sistemas se les conoce como "inyectores" y su función principal es la de dosificar nutrientes y soluciones para regular el pH. Los sistemas de inyección de fertilizantes se han vuelto muy populares entre los agricultores comerciales ya que ahorran tiempo reduciendo el número de preparaciones de solución de nutrientes. También funcionan bien en la automatización del ajuste de la solución nutritiva mediante monitoreo por computadora e inyección de soluciones. [4]

IV. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se realizaron cuatro (4) diferentes etapas, las cuales se enuncian y describen a continuación:

ETAPA 1

Revisión de información y Estado del arte. Modelamiento y caracterización del sistema a controlar.

En esta etapa se procedió a recopilar información y estado del arte sobre la hidroponía y los sensores utilizados en la medición de conductividad, pH y nivel de líquidos. Se realizaron diferentes mesas de trabajo con los líderes del proyecto Paqúa a fin de establecer los requisitos de control, lineamientos generales de diseño y consideraciones generales para el proyecto.

Los sistemas hidropónicos presentan un comportamiento típicamente lento, razón por la cual la regulación de pH y conductividad se ha venido realizando a través de la intervención humana cada quince días, mediante la dosificación de soluciones que permiten subir o bajar niveles de pH, o bien subir la conductividad.

El propósito del control a diseñar consiste principalmente en evitar o disminuir de manera considerable la intervención humana para el control de

las variables, de manera que el cultivo pueda crecer en condiciones óptimas.

De acuerdo a la necesidad, se establecieron los siguientes parámetros de control:

Descripción	Valor	Acciones a realizar
EC Mínima	< 1.6 mS/cm	Agregar 2 cm ³ de Nutriente A y 1cm ³ de Nutriente B
EC Máxima	> 2.5 mS/cm	Encender LED de Alerta. Se requiere agregar agua. Intervención del usuario requerida. No se puede realizar dosificación.
pH Mínimo	< 5.8	Agregar 0.5 cm ³ de líquido pH Up
pH Máximo	> 6.5	Agregar 0.5 cm ³ de líquido pH Down
Nivel de Agua	Bajo	Encender LED de Alerta. Intervención del usuario requerida. No se puede realizar bombeo ni dosificación.
Nivel de pH UP	Bajo	Encender LED de Alerta. Intervención del usuario requerida. No se puede realizar dosificación de pH.
Nivel de pH Down	Bajo	Encender LED de Alerta. Intervención del usuario requerida. No se puede realizar dosificación de pH.
Nivel de Nutriente A	Bajo	Encender LED de Alerta. Intervención del usuario requerida. No se puede realizar dosificación de Nutrientes.
Nivel de Nutriente B	Bajo	Encender LED de Alerta. Intervención del usuario requerida. No se puede realizar dosificación de Nutrientes.

Figura 2. *Parámetros de control.* Fuente: Autores.

ETAPA 2

Elección de los sensores y tarjeta de desarrollo.

A. Caracterización de los sensores

Con base en la información obtenida en la etapa precedente, y conforme a los parámetros de control establecidos se procedió a seleccionar los más convenientes en términos de funcionalidad y bajo costo para cada una de las variables del sistema, así como los actuadores y la tarjeta de desarrollo.

B. Tarjeta de desarrollo

Se seleccionó la tarjeta de desarrollo Arduino UNO, basada en el microcontrolador ATmega328P.

Además del costo, la versatilidad y facilidad de programación fueron factores clave en la selección de

Arduino UNO como la plataforma para el desarrollo del prototipo.

La versión R3 de Arduino UNO incorpora una memoria Flash de 32kB, 14 pines de entrada/salida digitales, y 6 entradas digitales [6], que aunque justas resultaron suficientes para ejecutar el programa principal, y manejar los sensores, actuadores y periféricos del sistema. El programa se valió de la memoria EEPROM de 1kB para el registro de eventos y lecturas de los sensores de pH y conductividad para la posterior etapa de análisis de resultados.

Arduino UNO, por otra parte soporta el bus I2C, que resultó ideal para comunicarse con más de un periférico utilizando únicamente dos pines del microcontrolador.

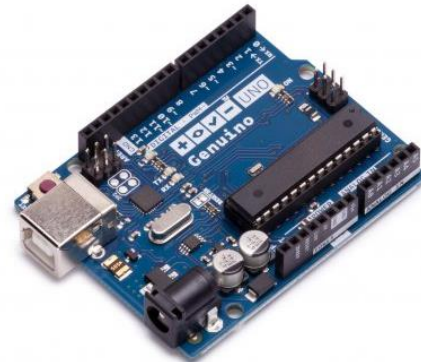


Figura 3. *Arduino UNO.* Fuente: www.arduino.cc.

C. Sensor pH

Bajo criterios de funcionalidad y costo se seleccionó el kit "Analog pH Meter Pro" de DFRobot que incluye un sensor industrial con precisión de ± 0.1 pH a 25°C y que el fabricante especifica que puede permanecer sumergido en el fluido por periodos prolongados, junto con un transmisor que entrega la señal escalizada de 0-5VDC para un rango de pH de 0 a 14 [7], y cuya adquisición además resultó bastante simple desde una de las entradas análogas de la tarjeta de desarrollo. El transmisor cuenta también con un potenciómetro de ajuste de ganancia para su calibración en soluciones alcalinas o ácidas.



Figura 4. *Analog pH Meter Pro*. Fuente: www.dfrobot.com.

D. Sensor Electroconductividad

Se utilizó el módulo “MinieC” de Sparky’s Widgets por su versatilidad para trabajar con diversos tipos de electrodos [8].

El módulo entrega una señal digital de 12 bits a través del bus I2C, que debe ser escalizada por software con los puntos extremos típicos del rango de conductividad de la solución a medir.

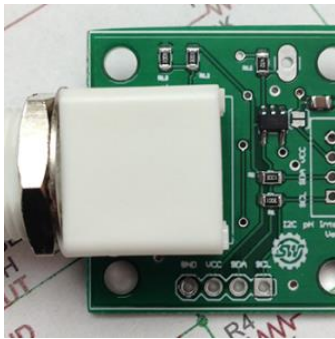


Figura 5. *Interfaz para lectura de conductividad (minieC)*. Fuente: Autores.

Inicialmente se construyeron sensores caseros utilizando filamentos de cobre y de aluminio cromel, sin embargo se obtuvo un rango de lecturas demasiado estrecho que hizo imposible escalizar y obtener medidas confiables de conductividad.

Se procedió entonces a la búsqueda de un sensor industrial, robusto y de bajo costo que pudiera permanecer sumergido y se adquirió el modelo EC-451 de Jishen Water Equipment Co., Ltd. El sensor cuenta con electrodos en platino y está diseñado para trabajar en un rango de 0-20mS, con una constante de 1,0cm-1, e incluye un sensor de temperatura tipo NTC de 10k [9].



Figura 6. *Sensor de conductividad referencia EC-451*. Fuente: Autores.

E. Módulo de aislamiento galvánico

Al trabajar con los sensores de pH y electroconductividad de manera simultánea, se logró identificar una mutua interferencia debido a que los circuitos de ambos sensores compartían la misma tierra física. Para sobrellevar este inconveniente se hizo necesario incluir una etapa de aislamiento galvánico. Se procedió entonces a adquirir el módulo “I2C Isolation Breakout” de Sparky’s Widgets, que no sólo ofrece aislamiento de la fuente de alimentación, sino también del bus I2C que normalmente se encuentra atado a VCC a través de resistencias de pull-up [10].

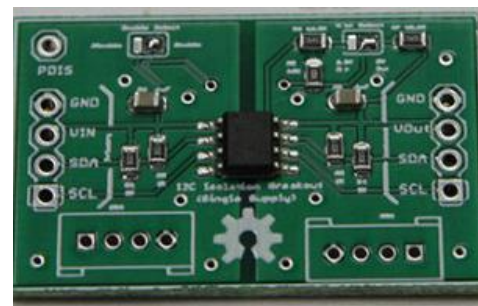


Figura 7. *Módulo de aislamiento galvánico (I2C Isolation Breakout)*. Fuente: www.sparkyswidgets.com.

F. Bombas

Dado que el sistema debe entregar volúmenes muy pequeños desde recipientes no presurizados (soluciones de control de pH y nutrientes), se decidió emplear la técnica de goteo y trabajar con cuatro bombas peristálticas de muy bajo costo, que trabajan a 6VDC y pueden entregar un flujo de entre 20 y 60ml/min.



Figura 8. Bomba Peristáltica. Fuente: www.amazon.com.

La etapa de potencia se manejó a través del circuito integrado L293D que cuenta con cuatro canales, cada uno de los cuales puede entregar hasta 600mA. Vale aclarar que el control fue diseñado para que sólo una bomba funcione a la vez.

G. Bomba Principal

Para la recirculación de agua en todo el cultivo, se utilizó la misma bomba de acuario que Paqua emplea habitualmente, controlando su operación a través de un relé SPDT.

H. Tanque e Interruptor de tipo flotador

El tanque contiene la mayor parte de agua del sistema. Las soluciones de pH Up, pH Down y los Nutrientes A y B se aplican directamente al agua del tanque. Los sensores de pH y Conductividad sensan directamente el agua de este tanque. El interruptor de tipo flotador se utiliza para detectar el nivel mínimo de agua en el tanque. Cuando el agua se encuentra por debajo del nivel mínimo, el interruptor se abre y detiene cualquier operación del sistema, entregando una alerta al usuario.

I. Recipientes para las soluciones y electrodos detectores de nivel

Se utilizaron recipientes plásticos con capacidad de 125ml para las cuatro soluciones a utilizar: pH Up, pH Down, Nutriente A y Nutriente B. Se adaptaron dos electrodos con el fin de detectar el nivel de líquido en cada recipiente. Cuando el nivel de solución se encuentra por debajo de los electrodos, no hay conductividad, por tanto el circuito queda abierto, enviando una alerta al usuario y deteniendo la dosificación de la solución de ese recipiente.



Figura 9. Bomba de acuario. Fuente: www.amazon.com.

ETAPA 3

Diseño del controlador, programación e implementación sobre la tarjeta de desarrollo. Pruebas de funcionamiento y ajustes.

En esta etapa se diseñó el sistema de control y se realizó la programación sobre la tarjeta de desarrollo.

1) Generalidades de la programación:

A. Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) y lenguaje de programación

El desarrollo del programa se realizó sobre el software Arduino, IDE versión 1.6.9 de código abierto (Open-Source), provisto para este dispositivo. El entorno de desarrollo integrado está basado en lenguaje C/C++ [7].

B. Programación orientada a objetos

Se utilizó el concepto de programación orientada a objetos para la implementación de los diferentes subsistemas incluidos. Esto permite almacenamiento de variables propias del objeto, creación de clases y métodos[8] para el desarrollo de las diferentes tareas asociadas a cada subsistema y adicionalmente, se logra replicar características de funcionamiento para elementos de comportamiento similar dentro del sistema, por ejemplo, el control de dosificación de las bombas peristálticas.

C. Multitareas

Se implementó el código basado en multitareas [9], que permitiera ejecutar de manera casi simultánea todos los procesos requeridos para el sistema. Para ello se utilizó la función millis(), la cual retorna el número de milisegundos desde que la tarjeta Arduino comenzó a correr el programa. Este número se desborda y vuelve a cero después de aproximadamente 50 días de operación. Mediante esta función es posible calcular el tiempo que debe transcurrir para la ejecución de una tarea, de manera que en los tiempos de inactividad de una tarea específica, pueda revisar el cumplimiento de otras tareas.

Al ser un sistema de respuesta lenta, la ejecución de algunas tareas de larga duración no impacta en tiempos de demora relevantes para la ejecución de tareas, de

manera que tan pronto se termina una tarea de larga duración, inicia la tarea pendiente por ejecutar.

D. Tareas con tiempos de ejecución específicos.

Las tareas que requieren tiempos de ejecución específicos y no dan cabida a la ejecución de multitareas, se llevan a cabo mediante la función `delay(milisegundos)` [10]. Esta función realiza esperas del tiempo especificado en milisegundos y no permite que el microcontrolador realice otra actividad. En esta categoría se encuentran las funciones que permiten la dosificación de soluciones de pH y nutrientes, en razón a que el tamaño de la gota generada depende del tiempo especificado para la activación de la bomba peristáltica.

E. Watchdog.

Con el fin de prevenir bloqueos durante la operación normal del sistema y ante periodos largos de inadvertencia del operador, se activó el Watchdog o perro guardián en el tiempo máximo posible, para este efecto de ocho (8) segundos [10]. Cuando una tarea específica tarda más de este tiempo por cualquier tipo de bloqueo del programa, la tarjeta se reinicia automáticamente.

F. I2C

Los módulos de reloj e interfaz para el módulo de EC utilizan comunicación serial I2C. Esta comunicación permite reducir el número de puertos de entrada y salida que debe usarse de la tarjeta de desarrollo Arduino a sólo dos (2) puertos, correspondientes a los pines de reloj (SCL) y datos (SDA) [11].

G. Parámetros

A fin de permitir flexibilidad en la implementación del código, de tal forma que diversas condiciones del mismo pudieran de manera sencilla y sin tener que editar múltiples campos dentro del código, además de permitir la realización de pruebas y ajustes de configuración por motivo de calibración de los sensores, se establecieron diversos parámetros editables en el encabezado del código de programa mediante la función `#define parámetro valor`.

H. Librerías

Se utilizaron las siguientes librerías para la implementación del programa. Se incluyeron al código mediante el comando `#include <librería>` :

Librería	Descripción [12]
Wire.h	Esta librería permite la configuración de la comunicación I2C.

Librería	Descripción [12]
EEPROM.h	Mediante esta librería se gestiona la memoria EEPROM del microcontrolador del Arduino.
RTCLib.h	Esta librería permite obtener información sobre el módulo RTC mediante la comunicación I2C
LiquidCrystal.h	Esta librería gestiona el display de cristal líquido LCD.
avr/wdt.h	Con esta librería se gestiona el perro guardián (Watchdog) incluido en el Arduino

Tabla 1. Librerías Utilizadas. Fuente: Autores.

2) Subsistemas

A. Control LCD

Este subsistema permite el control de la pantalla de visualización LCD para despliegue de los menús y estado del sistema. Cada cambio en el menú depende de lo indicado por el subsistema de control del teclado, de manera que su visualización se modifica en función del botón o los botones oprimidos. También se despliegan mensajes cuando se ejecutan tareas automáticas de dosificación o bombeo.

El menú tiene la siguiente estructura:

Menu	Nombre Menú	Sub menu	Nombre Submenu	Descripción
0	Menú Principal	0		Pantalla principal. Muestra la hora y la temperatura del módulo RTC.
1	Monitoreo Variables	0		Muestra información de niveles de pH y Conductividad (en mS). Indica cuando una variable se encuentra por fuera de los rangos normales de operación.
2	Monitoreo Tanque	0		Muestra el estado del nivel de agua del tanque principal.
3	Monitoreo Niveles	0		Muestra el estado del nivel de solución de los recipientes de pH Up, pH Down, Nutriente A y Nutriente B.
4	Registros	0		Permite acceder a los registros de última dosificación de las diferentes variables.
4	Registros	1	UltDosifPhUp	Muestra la fecha y hora de la última dosificación de pH Up
4	Registros	2	UltDosifPhDn	Muestra la fecha y hora de la última dosificación de pH Down
4	Registros	3	UltDosifNutA	Muestra la fecha y hora de la última dosificación de Nutriente A

Menu	Nombre Menú	Sub menu	Nombre Submenu	Descripción
4	Registros	4	UltDosifNutB	Muestra la fecha y hora de la última dosificación de Nutriente B
4	Registros	5	Exit	Permite salir al menú principal
5	Ajuste Fecha	0		Permite realizar el ajuste de la fecha del RTC
5	Ajuste Fecha	1	AjusteYear	Permite realizar el ajuste del año actual
5	Ajuste Fecha	2	AjusteMes	Permite realizar el ajuste del mes actual
5	Ajuste Fecha	3	AjusteDia	Permite realizar el ajuste del día actual
5	Ajuste Fecha	4	Exit	Permite salir al menú principal
6	Ajuste Hora	0		Permite realizar el ajuste de la hora del RTC
6	Ajuste Hora	1	AjusteHora	Permite realizar el ajuste de la hora actual
6	Ajuste Hora	2	AjusteMin	Permite realizar el ajuste del minuto actual
6	Ajuste Hora	3	Exit	Permite salir al menú principal
7	Memoria	0		Permite acceder a los registros de memoria EEPROM
7	Memoria	1	MemControl	Permite visualizar y modificar los registros de control de memoria
7	Memoria	2	MemWD	Permite visualizar y modificar los registros del watchdog y muestra la fecha y hora de los eventos de reinicio
7	Memoria	3	MempH	Permite visualizar los registros de pH
7	Memoria	4	MemEC	Permite visualizar los registros de Conductividad
7	Memoria	5	MemTemp	Permite visualizar los registros de Temperatura
7	Memoria	6	MempHUPDN	Permite visualizar los registros de dosificaciones de pH Up y pH Down
7	Memoria	7	MemNutAB	Permite visualizar los registros de dosificaciones de Nutriente A y Nutriente B
7	Memoria	8	Exit	Permite salir al menú principal
8	Avanzado	0		Permite acceder a funcionalidades avanzadas del sistema
8	Avanzado	1	PurgaPpal	Activa manualmente la bomba principal
8	Avanzado	2	PurgaPhUp	Activa manualmente la bomba de pH Up
8	Avanzado	3	PurgaPhDn	Activa manualmente la bomba de pH Down
8	Avanzado	4	PurgaNutA	Activa manualmente la bomba de Nutriente A
8	Avanzado	5	PurgaNutB	Activa manualmente la bomba de Nutriente B
8	Avanzado	6	ActivarPH	Activa/Desactiva la dosificación de soluciones de pH

Menu	Nombre Menú	Sub menu	Nombre Submenu	Descripción
8	Avanzado	7	ActivarNut	Activa/Desactiva la dosificación de soluciones de Nutrientes
8	Avanzado	8	ActivarReg	Activa/Desactiva los registros en memoria de pH, Conductividad y dosificación de soluciones de pH y Nutrientes
8	Avanzado	9	ResetReg	Reestablece en cero todos los valores en memoria, excepto los de configuración.
8	Avanzado	10	ActivarWD	Activa/Desactiva los registros Watchdog en memoria por reinicio del sistema.
8	Avanzado	11	Exit	Permite salir al menú principal

Tabla 2. Estructura menú LCD. Fuente: Autores.

B. Control Teclado

Este subsistema permite monitorear el puerto analógico al cual se encuentran conectados los botones. En este dispositivo se plantea el uso de dos botones, uno para seleccionar y otro para desplazar. Mediante una red R2R se ajustan diferentes valores analógicos según el botón o los botones presionados, de manera que se tiene un rango de niveles de voltaje de acuerdo a la acción del usuario que se traduce en una señal binaria [13]. Para establecer los niveles apropiados de acuerdo al botón o los botones presionados, se realizaron mediciones de voltajes obtenidos en las diferentes combinaciones, de manera que se ajustaran las fronteras de nivel de voltaje en cada punto intermedio de la medición. Lo anterior se plasma en la siguiente tabla.

Entradas			Valores de los intervalos		
Boton 1	Boton 2	Voltaje real (V)	Valor inicial (V)	Valor final (V)	Tamaño del intervalo (V)
0	0	0	0	0,75	0,75
0	1	1,5	0,75	2,05	1,3
1	0	2,6	2,05	3,175	1,125
1	1	3,75	3,175	5	1,825

Tabla 3. Tabla de niveles de voltaje teclado para un voltaje de alimentación de 5,04V. Fuente: Autores.

C. Monitoreo EC

Este subsistema permite el monitoreo de la conductividad del agua. Configura la comunicación I2C para realizar la lectura del sensor de conductividad. Dado que el valor obtenido viene de una conversión de información analógica a digital, se realiza la captura de cincuenta (50) datos y se promedian, a fin de mitigar el efecto de datos atípicos. El intervalo de tiempo de lectura es parametrizable. A partir de la calibración del sensor, se aplica la siguiente fórmula de ajuste para la obtención del valor de conductividad:

$$EC (mS) = (promedio * 32.194) - 1476.746$$

D. Monitoreo pH

Mediante este subsistema se realiza la lectura de los niveles de pH. El módulo pH se lee desde un puerto analógico, por lo tanto, se obtiene un valor entre 0V y 5V. Para evitar efectos de datos atípicos, se toma lectura de cincuenta (50) datos y se obtiene un promedio de los mismos. El intervalo de tiempo de lectura es parametrizable. A partir de la calibración del sensor, se aplica la siguiente fórmula de reajuste para la obtención del valor de pH:

$$pH = promedio * \frac{17.5}{1024}$$

E. Monitoreo Niveles

A través de este módulo de control se realiza un monitoreo de la presencia de solución en cada uno de los tanques. Se requiere monitorear cuatro (4) niveles de solución: pH Up, pH Down, Nutriente A y Nutriente B. Con el fin de evitar el uso de cuatro puertos digitales, se planteó el uso de una red R2R donde se ajustaron diferentes valores analógicos según la combinación de posibles estados de cada uno de los sensores de nivel [13].

De esta manera, se establece un rango de niveles de voltaje de acuerdo a las diferentes posibilidades de estado de los sensores. Para establecer los niveles apropiados, se realizaron mediciones de voltajes obtenidos en las diferentes combinaciones, de manera que se ajustaran las fronteras de nivel de voltaje en cada punto intermedio de la medición. Lo anterior se plasma en la siguiente tabla.

Entradas					Intervalo		
pH Up	pH Down	Nut A	Nut B	Voltaje Real (V)	Valor inicial (V)	Valor final (V)	Tamaño del intervalo (V)
0	0	0	0	4,41	4,195	5	0,805
0	0	0	1	3,98	3,78	4,195	0,415
0	0	1	0	3,58	3,4	3,78	0,38
0	0	1	1	3,22	3,085	3,4	0,315
0	1	0	0	2,95	2,77	3,085	0,315
0	1	0	1	2,59	2,435	2,77	0,335
0	1	1	0	2,28	2,13	2,435	0,305
0	1	1	1	1,98	1,94	2,13	0,19
1	0	0	0	1,9	1,725	1,94	0,215
1	0	0	1	1,55	1,4	1,725	0,325
1	0	1	0	1,25	1,105	1,4	0,295
1	0	1	1	0,96	0,88	1,105	0,225
1	1	0	0	0,8	0,65	0,88	0,23

Entradas					Intervalo		
pH Up	pH Down	Nut A	Nut B	Voltaje Real (V)	Valor inicial (V)	Valor final (V)	Tamaño del intervalo (V)
1	1	0	1	0,5	0,385	0,65	0,265
1	1	1	0	0,27	0,15	0,385	0,235
1	1	1	1	0,03	0	0,15	0,15

Tabla 4. Intervalo de voltajes para monitoreo de niveles de los tanques. Fuente: Autores.

F. Control dosificación

Este módulo se encarga de realizar las dosificaciones de soluciones de pH Up, pH Down, Nutriente A y Nutriente B bajo las siguientes consideraciones:

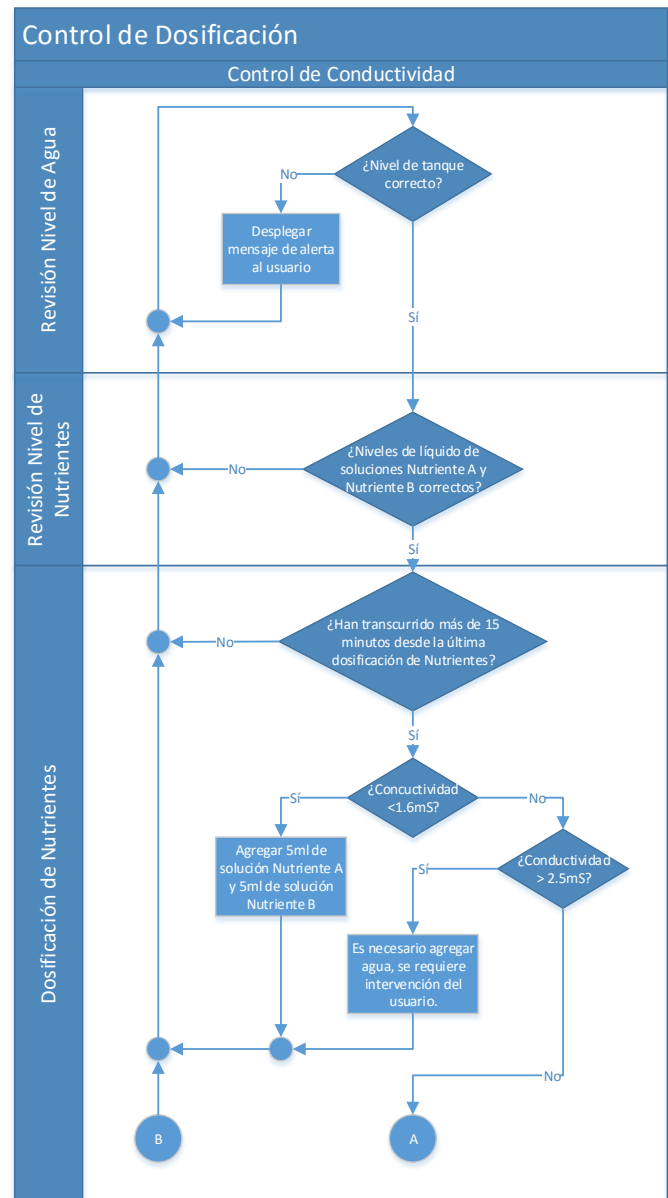


Figura 10. Diagrama de flujo del control de dosificación de conductividad. Fuente: Autores.

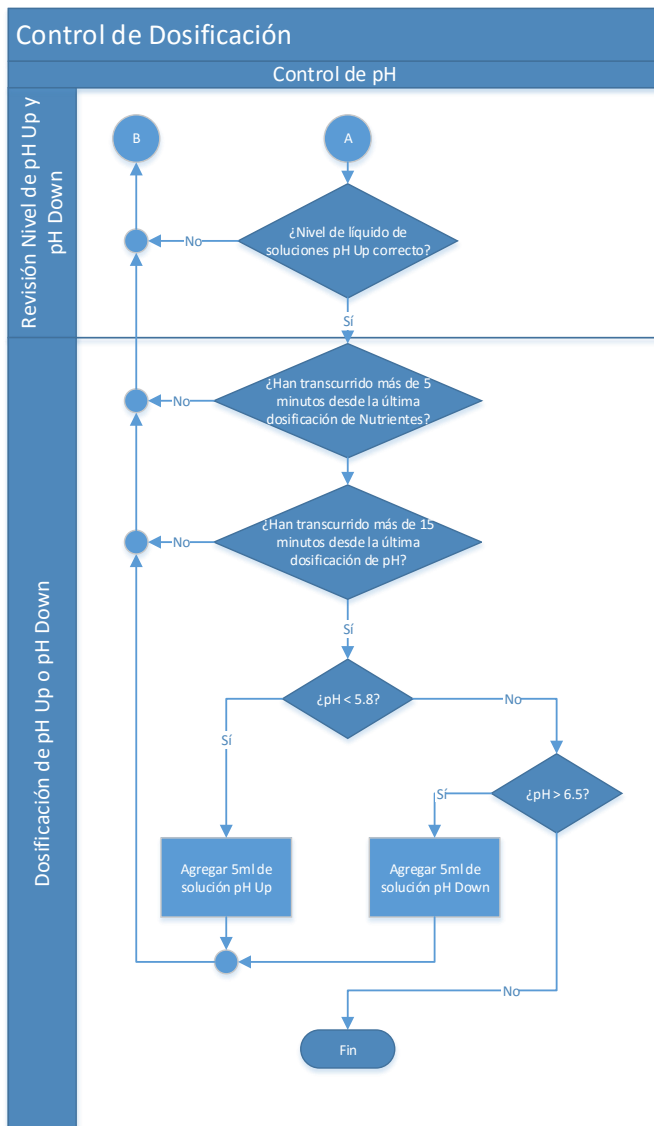


Figura 11. Diagrama de flujo del control de dosificación de pH. Fuente: Autores.

G. Control bombas peristálticas

Este subsistema permite la dosificación de sustancias por goteo. Para generar la gota, se debe generar un tren de pulsos del tipo PWM. En los parámetros de la programación se ajusta el tiempo durante el cual la señal se mantiene activa, el tiempo de señal inactiva y la cantidad de pulsos (gotas) por dosificación por cada una de las bombas peristálticas.

Se realizó una calibración de las bombas midiendo el volumen de líquido obtenido a partir de diez gotas. En la siguiente tabla se muestra el resultado de la calibración para obtener un volumen de 5ml de solución:

		Volumen (mL)			
		Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4
Duración gota	Gotas	pH+	pH-	NutA	NutB
100ms	10	0,91	0,92	1,21	1,02
100ms	10	0,91	1,08	1,24	1,00
100ms	10	0,91	1,09	1,28	1,02
100ms	10	0,92	1,09	1,30	0,97
100ms	10	0,92	1,09	1,29	1,03
100ms	10	0,88	1,08	1,27	0,97
100ms	10	0,90	1,04	1,25	0,92
100ms	10	0,94	1,04	1,21	1,04
100ms	10	0,92	1,00	1,23	0,94
100ms	10	0,92	1,02	1,26	1,00
Promedio		0,913	1,045	1,254	0,991
Desviación Estándar		0,0157	0,0546	0,0317	0,0398
%VAR		1,72%	5,23%	2,53%	4,02%
Volumen/Gota		0,0913	0,1045	0,1254	0,0991
Gotas Requeridas para 5ml		5,4765	4,7847	3,9872	5,0454
Cantidad Gotas Real		5	5	4	5
Volumen/Gota (Real)		0,4565	0,5225	0,5016	0,4955
Error		9,13%	10,45%	10,03%	9,91%

Tabla 5. Calibración de cantidad de gotas por bomba para obtener 5ml de solución. Fuente: Autores.

H. Control bomba principal

Este módulo activa la bomba de acuario para la recirculación de agua en todo el sistema. De acuerdo a los lineamientos establecidos por la empresa Paqua, esta bomba debe activarse según las siguientes condiciones:

- Si el nivel de agua del tanque está por debajo del nivel mínimo, no debe activarse la bomba principal.
- Se debe realizar un bombeo cada dos (2) horas con una duración de quince (15) minutos.

I. Control Memoria

Mediante este módulo de control se gestionan y administran las funciones de registro en la memoria EEPROM del microcontrolador. En razón a que este sistema debe permanecer en funcionamiento constante, puede existir situaciones en las que se bloquee el sistema. Cuando se reinicia manualmente o por acción del Watchdog, deben permanecer las configuraciones realizadas por el usuario. Las siguientes son las funcionalidades presentes en este módulo:

- Registro de parámetros de configuración para evitar su pérdida por motivos de reinicio manual o por efectos del Watchdog.
- Registro de los quince (15) últimos eventos de reinicio a fin de revisar la fecha y hora en la cual se reinició el sistema. El objetivo de esta

funcionalidad es evaluar la estabilidad del sistema.

- Registro del valor de pH por hora hasta un máximo de ocho días.
- Registro del valor de conductividad por hora hasta un máximo de ocho días.
- Registro del número de dosificaciones de pH Up y pH Down por hora hasta un máximo de ocho días.
- Registro del número de dosificaciones de Nutriente A y Nutriente B por hora hasta un máximo de ocho días.

3) Implementación del sistema

A. Esquema de conexiones en la tarjeta de desarrollo

A continuación se presenta el diagrama de conexiones de los diferentes componentes de hardware.



Figura 12. Diagrama de conexiones. Fuente: Autores.

B. Prototipo de pruebas

Las pruebas funcionales se realizaron sobre un circuito de prueba previo al diseño del PCB definitivo. El prototipo del sistema se dejó en funcionamiento por un periodo de ocho días con el control de dosificación activo.

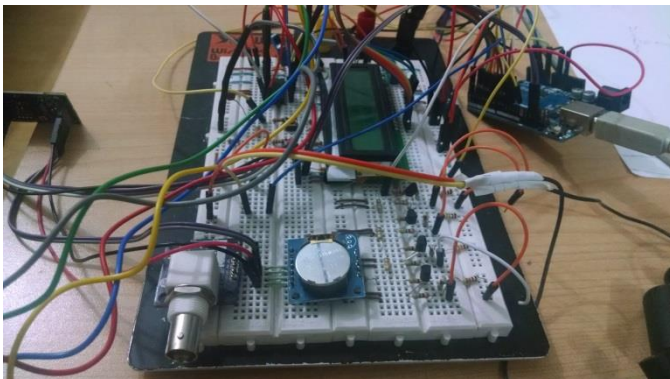


Figura 13. Fotografía del prototipo de pruebas. Fuente: Autores.



Figura 14. Fotografía del prototipo de pruebas. Fuente: Autores.

C. Diseño del PCB e implementación del circuito

Una vez verificada la funcionalidad del prototipo de pruebas se procedió a diseñar dos circuitos impresos, uno para la parte de control (que contiene el microcontrolador) y otro para el monitoreo de nivel de los tanques de las soluciones de control.

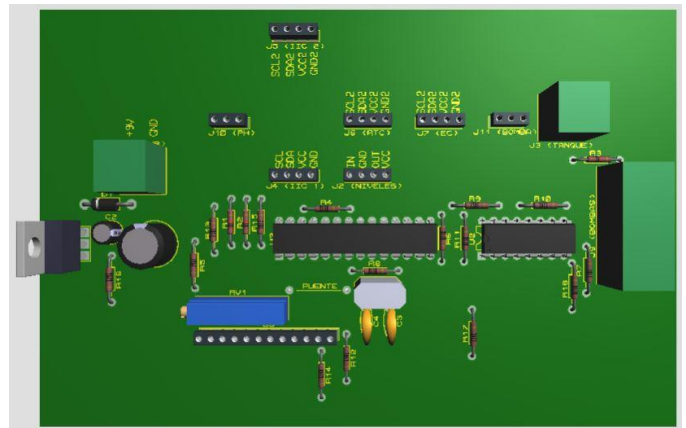


Figura 15. Diseño del PCB de control. Fuente: Autores.

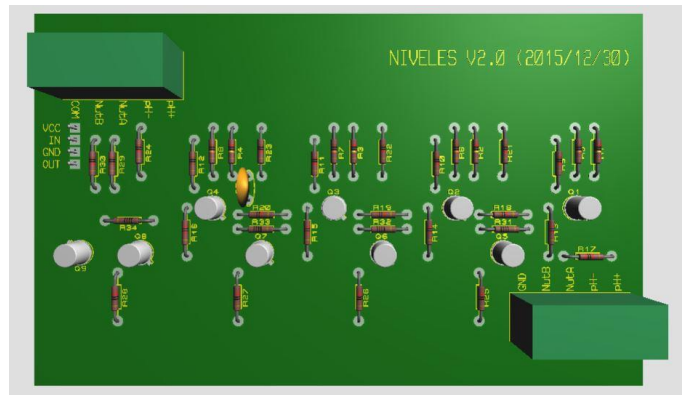


Figura 16. Diseño del PCB para monitoreo de niveles. Fuente: Autores.

ETAPA 4

Análisis de resultados y documentación. Finalización del Documento.

Esta etapa consistió en el análisis de resultados y la generación de la documentación respectiva.

V. RESULTADOS

A. Conductividad

Los siguientes son los registros de conductividad, incluyendo las dosificaciones de Nutrientes A y B obtenidos mediante la funcionalidad de registro en memoria:

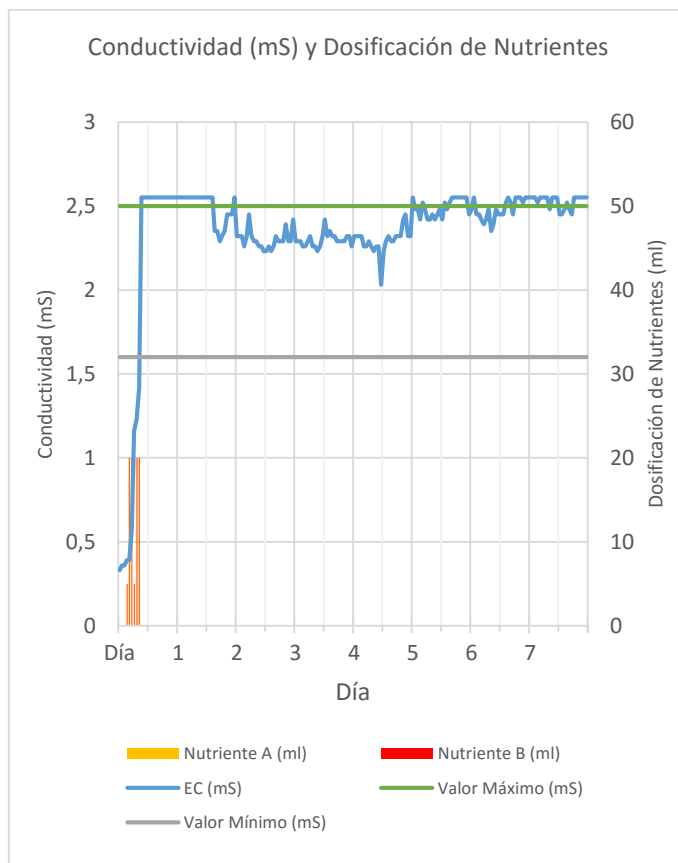


Figura 17. Registros de conductividad y dosificación de nutrientes. Fuente: Autores.

B. pH

Los siguientes son los registros de pH, incluyendo las dosificaciones pH Up y pH Down obtenidos mediante la funcionalidad de registro en memoria:

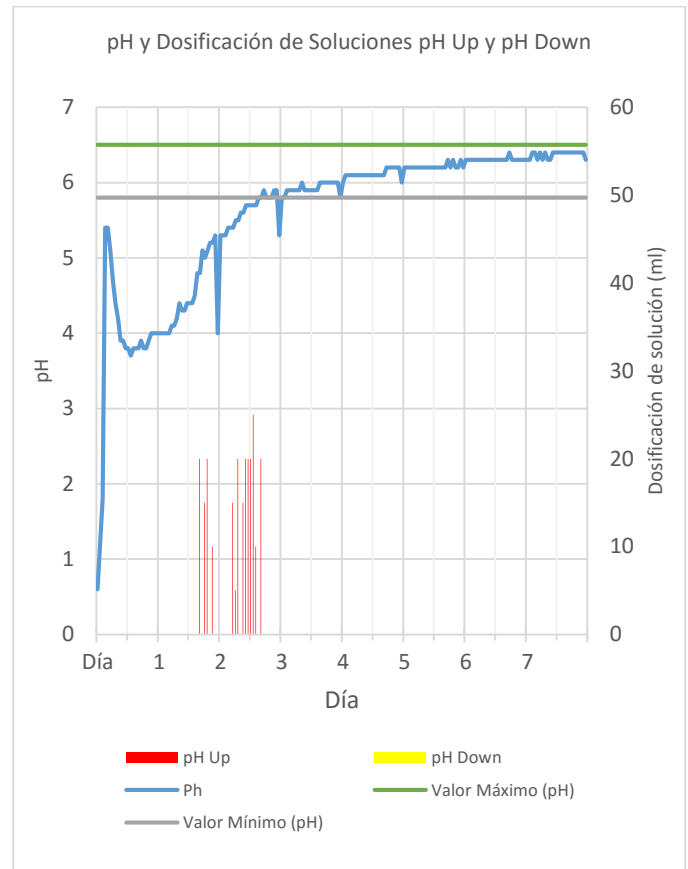


Figura 18. Registros de pH y dosificación de soluciones pH Up y pH Down. Fuente: Autores.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El sistema tuvo el comportamiento esperado. Inicialmente realizó dosificaciones de nutrientes para corregir el valor de conductividad que se encontraba por debajo del límite inferior. Esta corrección se logró en las primeras ocho horas de funcionamiento. Sin embargo, una vez corregido, el valor de conductividad sobrepasó el límite superior, con lo que el sistema no realizó ninguna corrección adicional hasta que la conductividad se encontrara en el rango correcto. Una vez corregida la conductividad, el sistema dosificó la solución pH Up, a fin de corregir el valor de pH que se encontraba por debajo del límite inferior. La corrección en pH tardó un día completo.

A partir del cuarto día, el sistema se mantuvo estable dentro de los parámetros establecidos, con el valor de conductividad sobrepasando en algunas ocasiones el límite superior, con lo cual se requiere intervención del usuario para añadir agua al sistema. Lo anterior se debe a efectos de rápida absorción de agua de la planta y por contar con un tanque de agua de pequeña capacidad para las pruebas de desempeño.

VII. CONCLUSIONES

De los registros obtenidos, se pudo evidenciar que el control hidropónico funcionó como se requería. Cuando los valores se encontraron fuera de rango, el control actuó bajo los parámetros establecidos, estabilizando primero la conductividad y posteriormente el pH. Sin embargo, se evidenció también que el sistema es bastante estable, posiblemente debido a que la prueba se realizó con un número limitado de plantas en un tanque de baja capacidad de agua. Una vez estabilizados los parámetros, se pudo evidenciar que los valores permanecen poco variantes en el tiempo.

A futuro se puede incorporar la funcionalidad de medición de temperatura ambiente aprovechando la opción disponible en el módulo RTC, a fin de tener datos adicionales sobre el cultivo. Adicionalmente se podría implementar un control para adición automática de agua al sistema para mitigar el efecto de la conductividad alta.

Para una investigación más detallada, posiblemente se requiera disponer de una ventana de tiempo más grande para analizar el comportamiento de las variables y el efecto del control automático frente a un sistema no controlado ni supervisado.

El presente proyecto abre la puerta a la aplicación de tecnologías integrales al ámbito de los cultivos hidropónicos con destinación a los hogares, de manera que se pueda contar con cultivos en casa bajo las condiciones óptimas para su crecimiento.

VIII. RECONOCIMIENTO

Los autores reconocen las contribuciones del grupo Paquí en la realización del presente proyecto. Adicionalmente el acompañamiento y las sugerencias por parte del Docente Darío Amaya.

IX. REFERENCIAS

- [1] M. d. P. Pinzón, *Memorias curso de Hidroponía*, Bogotá.
- [2] M. y. o. s. García, Una publicación del Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2004.
- [3] J. J. Benton Jones, CRC Press, 2004.
- [4] H. M. Resh, CRC Press, 2001.
- [5] L. C. Vargas, 2011.
- [6] «Arduino UNO & Genuino UNO,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 1 Julio 2016].
- [7] «Analog pH Meter Pro,» DF Robot, [En línea]. Available: <http://www.dfrobot.com/>. [Último acceso: 29 05 2016].
- [8] «Mini EC Interface,» Sparky's Widgets, [En línea]. Available: <https://www.sparkyswidgets.com/product/miniec-ec-interface/>. [Último acceso: 10 03 2016].
- [9] «Intelligent Conductivity meter, Conductivity controller with sensor EC-451,» JISHEN WATER TREATMENT CO.,LTD, [En línea]. Available: <http://watequipment.com/>. [Último acceso: 20 Enero 2016].
- [10] «I2C ISOLATION BREAKOUT,» Sparky's Widgets, [En línea]. Available: <https://www.sparkyswidgets.com/portfolio-item/i2c-isolation-breakout/>. [Último acceso: 23 Abril 2016].
- [11] «Download the Arduino Software,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. [Último acceso: 15 Junio 2016].
- [12] M. A. Alvarez, «Qué es la programación orientada a objetos,» 24 Julio 2001. [En línea]. Available: <http://www.desarrolloweb.com/articulos/499.php>. [Último acceso: 1 Julio 2016].
- [13] B. Earl, «Multi-tasking the Arduino - Part 1,» 3 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://learn.adafruit.com/multi-tasking-the-arduino-part-1/overview>. [Último acceso: 17 Mayo 2016].
- [14] «Apuntes de Arduino,» 2013. [En línea]. Available: <http://facilitamos.catedu.es/>. [Último acceso: 2016 Junio 28].
- [15] Tom, «Watchdog Timers (WDT),» Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://industruino.com/page/wdt>. [Último acceso: 10 Mayo 2016].
- [16] E. J. Carletti, «Comunicación - Bus I2C,» [En línea]. Available: http://robots-argentina.com.ar/Comunicacion_busI2C.htm. [Último acceso: 29 Mayo 2016].
- [17] «Libraries,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries>. [Último acceso: 8 Junio 2016].
- [18] M. A. I. Carrillo, *Tecnologías para el procesamiento digital de señales*, 2014.

X. AUTORES

A. Amaya, Ingeniero Electrónico, Universidad Cooperativa de Colombia. Candidato a Especialista en Informática y Automática Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

L. Cruz, Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de Colombia. Candidato a Especialista en Informática y Automática Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.