



# Monitoring and automation modules for a hydroponic system using fuzzy logic and computer vision

## Módulos de supervisión y automatización de un sistema hidropónico mediante lógica difusa y visión por computadora

David Josué Esquivel-Godoy<sup>\*1</sup>, Marco Aurelio Nuño-Maganda<sup>1</sup>, Yahir Hernández-Mier<sup>1</sup>, and Said Polanco-Martagón<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Victoria (UPV), Maestría en Ingeniería,  
Av. Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, 87138 Cd Victoria, Tamps.  
{1730051,mnunom,yhernandezm,spolancom}@upv.edu.mx

### Abstract

Hydroponic systems are related to the cultivation of plants without the need for soil, simply complying with the techniques based on the nutritional needs of plants, supplying their roots with a nutrient solution of minerals. In this paper, we implemented a DFT hydroponic system (Deep Flow Technique), which performs specific automated tasks to control the growth of plants, these tasks are: an algorithm capable of performing an automatic control, based on the methodology of fuzzy logic, where the system environmental parameters are regulated, using the antecedents, consequentials and inference rules given by the expert in the area. We developed a remote IoT-based monitoring of the state of plants germination using the segmentation of the seedling. The system requires the interaction of the IoT for monitoring the parameters obtained, using the MQTT protocol to exchange information using a mosquito broker-server on a Raspberry Pi 3 B+. In addition, we use an ESP32 microcontroller to exchange information with the broker-server to obtain the system parameters. These parameters are observed in two interfaces, a mobile one and a server, to monitor the humidity in the environment, its potential hydrogen (pH), electrical conductivity, and the temperature of the nutrient solution.

**Keywords**— Fuzzy Logic, Hydroponics, Computer Vision.

<sup>\*</sup> Autor de correspondencia

### Resumen

Los sistemas hidropónicos se basan en el cultivo de plantas sin la necesidad del suelo, simplemente cumpliendo las técnicas nutricionales de las plantas, suministrando a sus raíces una solución nutritiva de minerales. Dentro de esta investigación, se implementó un sistema hidropónico DFT (Deep Flow Technique), el cual realiza tareas específicas automatizadas para controlar el crecimiento de las plantas, dichas tareas son: un algoritmo capaz de realizar un control automático, utilizando la metodología de la lógica difusa, donde se regulan los parámetros ambientales del sistema, utilizando los antecedentes, consecuentes y reglas dadas por el experto del área. La observación del estado de germinación, se optó por métodos de visión por computadora, generando una segmentación en los semilleros. El uso del IoT (Internet of Things) para el monitoreo de los parámetros, utilizando el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), para realizar el intercambio de información, utilizando un broker-servidor mosquito en una Raspberry Pi 3 B+. Se utilizó un microcontrolador ESP32, para el intercambio de información, y son observados en dos interfaces: una móvil y un servidor. Estas interfaces monitorean la humedad, su potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica y la temperatura de la solución nutritiva.

**Palabras clave**— Lógica Difusa, Hidroponía, Visión por Computadora.

## I. Introducción

De acuerdo con el World Bank la economía de México depende de un 3.8 % del PIB a la agricultura en el 2020, colocándonos como la séptima potencia agrícola mundial [1].

Debido al aumento en la demanda de alimentos y lo que conlleva gastos de mano de obra, además que el último año el sector agrícola sufre de sequías debido a los problemas climáticos que se encuentran en el país, esto ha impulsado a la sociedad a buscar alternativas viables para aumentar la producción agrícola y así generar un aumento de exportación de alimentos. Por lo cual, hoy en día los agricultores se sienten motivados en experimentar con alternativas de agricultura de interiores como lo es: la acuaponía, aeroponía e hidroponía.

Dichas técnicas no conllevan al uso de suelo o algún sustrato, dando como resultado la mejora de condiciones económicas y en la agricultura. Además, generar cambios en el entorno agrícola da como lugar a alternativas que pueden generarse en todo el país, para aumentar la producción en un campo laboral específico, en el cual la agricultura viene siendo el mayor punto para nuestro país.

En este artículo, se propone un sistema de monitoreo y automatización de un sistema hidropónico, utilizando lógica difusa y visión por computadora. Este artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección II, se revisa el marco teórico. En la sección III, se describe la metodología seguida para la implementación de la solución propuesta. En la sección IV, se describen los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección V, se establecen las conclusiones y el trabajo futuro.

## II. Marco teórico

### II.1. Sistema hidropónico DFT

Este tipo de sistemas se basa en un método de cultivación en el cual las raíces de las plantas son colocadas en mantos de aguas profundas de una solución nutritiva. Los sistemas DFT son unos de los más utilizados en el mundo, ya que no cuenta con una limitante para su construcción. La principal función de este tipo de sistema es realizar una circulación de la solución nutritiva por periodos donde las raíces de las plantas se encuentren las 24 horas del día en el agua. Esta técnica se clasifica como un método circulante, ya que el sistema se encuentra cerrado, un diseño básico se puede observar en la Figura 1 [2].

### II.2. Lógica difusa en la hidroponía

La lógica difusa es un método matemático, en el cual se busca imitar el funcionamiento de las expresiones lingüísticas en términos numéricos. De esa inspiración se parte

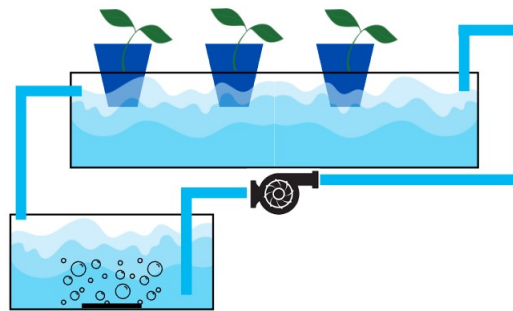


Figura 1: Diseño básico de un sistema DFT

de la extracción de un modelo de unidades conectadas entre sí, que generan, transmiten y refuerzan conceptos para llegar a conclusiones determinadas y consolidarlas como conocimiento con base en los antecedentes, consecuentes y reglas de inferencia específicas.

Del modo en el que nosotros expresamos el cómo se encuentra un sistema, en términos lingüísticos, la lógica difusa trabaja para tomar dichas expresiones y generar un cambio de una forma más precisa. En el ámbito de la hidroponía, el conocer o predecir valores acerca de los parámetros de un sistema son de suma importancia, ya que suelen perder información en alguna implicación. La misión de la lógica difusa es generar un controlador con base de ciertos puntos de un experto, que permita mantener los parámetros óptimos para un sistema hidropónico.

### II.3. El Internet de las Cosas (IoT) en la hidroponía

El Internet de las Cosas describe los objetos que se encuentran a nuestro alrededor que lleven incorporados algún sensor, software o alguna otra tecnología en sí, todo esto con el fin de interactuar entre dispositivos y sistemas a través del Internet, además de ser posible almacenar datos en la nube. Con base a esto, las IoT en la hidroponía pueden realizar monitoreos de parámetros que pueden generar un sistema hidropónico, como lo es: su nivel de pH, su conductividad eléctrica, la temperatura del agua, la humedad en el ambiente, entre otras más.

## III. Revisión de la literatura

En [3] se llevó a cabo la implementación de una red neuronal profunda en un sistema hidropónico para la obtención de los parámetros de pH dentro de una solución nutritiva con el uso de redes bayesianas y aprendizaje automático mandando los datos a un servidor utilizando las IoT.

En [4] llevó a cabo la implementación de una red neuronal para monitoreo del crecimiento de plantas de lechuga

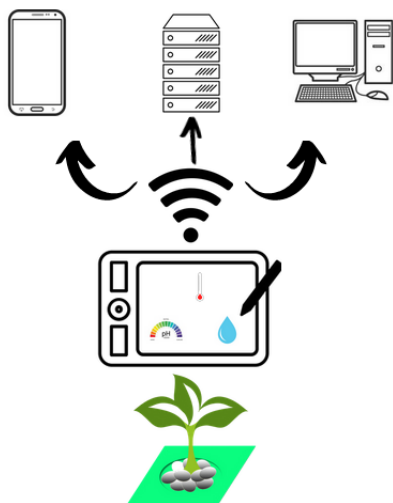


Figura 2: Modelo IoT

en un sistema NFT (Nutrient Film Technique), utilizando una cámara y la captura de imágenes para obtener distintas series temporales y así calcular los pixeles verdes y realizar el entrenamiento para la segmentación de las plantas.

En [5] llevó a cabo la implementación de un control difuso utilizando el método de Mamdani para un sistema DFT para controlar los parámetros solamente del pH en la solución nutritiva del sistema.

En [6] llevó a cabo la implementación de un control utilizando Node-MCU para obtener los parámetros de un sistema hidropónico tipo NFT, donde dicho control envía los parámetros del sistema mediante un protocolo de mensajería MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

En [7] llevó a cabo la implementación de un control difuso, utilizando el método de Sugeno para un sistema hidropónico de tipo DFT, para controlar los parámetros del pH, la humedad y la temperatura en la solución nutritiva, para después enviar los parámetros obtenidos a un servidor en la red.

#### IV. Metodología

##### IV.1. Sistema DFT

De acuerdo con la estructura básica de un sistema hidropónico de tipo DFT, este se creó mediante una estructura de tubos de PVC de diferentes medidas. Los tubos del sistema donde se encuentran las plantas son 8 tubos de 3 pulgadas, donde cada tubo se colocó intercalados a 22 centímetros de separación, y cuentan con 5 a 6 barrenos de 2 pulgadas.

Cada una de las medidas son para el uso óptimo del sembradío para este sistema, además de que su estructura se

Tabla 1: Comparativa entre sistemas similares

Sistema	Tipo de Sistema	Tipo de control	Sensores
1	NFT	Red Neuronal profunda	pH, Temperatura
2	NFT	Red Neuronal	Cámara
3	DFT	Control Difuso Mamdani	CE, pH, Temperatura
4	NFT	Control con Node-MCU	Temperatura, pH, CE, Humedad
5	DFT	Control Difuso Sugeno	pH, Temperatura
Sistema Propuesto	DFT	Control Difuso Mamdani	CE, pH, Temperatura, Humedad

adecua a una mesa cuadrada utilizando conexiones de tubería de tipo codo y T.

Para el sistema de alimentación se utilizó una bomba periférica de agua eléctrica de 1 pulgada y 1/2 caballos de fuerza, los cuales son suficientes para generar el caudal que necesita el sistema. El uso de conexiones para la bomba, se basa en tubos de 1 pulgada, utilizando una separación mediante conexiones tipo T y llaves de paso, para la regulación correcta entre canales de riego.

Además, se realizó una salida de retorno en la bomba para generar una mejor oxigenación hacia la solución nutritiva. Por último, se realizó una salida de desagüe hacia el tanque donde se encuentra la solución, el sistema se puede observar en la Figura 3.



Figura 3: Sistema hidropónico DFT propuesto

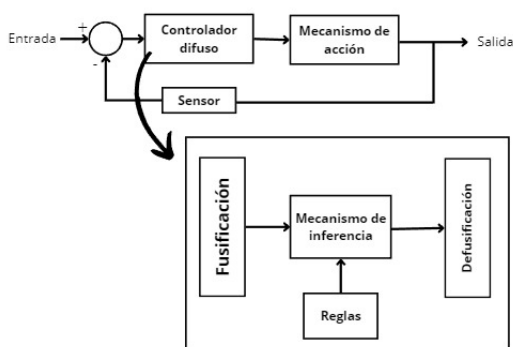


Figura 4: Modelo de un controlador difuso

### IV.2. Lógica difusa

El modelo de un controlador difuso se divide en 4 etapas, se pueden observar en la Figura 4.

**Parámetros previos:** En la primer etapa se deben tener en cuenta las entradas y salidas del sistema, ya que estas son las encargadas de ser los antecedentes y consecuentes de las reglas de inferencia, además de generar sus propios universos de discurso dentro de los valores de referencia en el sistema.

La entrada del controlador es el error en los sensores y su salida es un poco más interesante, como se mencionó en la Sección I, el controlador empleado es un ESP32, donde se utilizarán sus salidas analógicas para generar un PWM, que genere el control de voltaje para las bombas peristálticas y llegar a un parámetro de referencia adecuado para el sistema, por lo tanto esta será la salida. Enseguida se obtiene la semántica de las entradas y salidas utilizando funciones lineales o no lineales para nuestros términos lingüísticos, estas funciones pueden ser triangulares, trapezoidales, tipo sigmoide, campana de bell, entre otras.

En nuestro caso se utilizan funciones lineales: triangulares y trapezoidales. Esto, por el uso práctico por el IDE de Arduino para la programación del ESP32, ya que solo puede manejar este tipo de funciones.

Para la entrada sus 5 términos lingüísticos para el error son:

- Error Negativo Grande (ENG)
- Error Negativo Pequeño (ENP)
- Error Cero (EC)
- Error Positivo Pequeño (EPP)
- Error Positivo Grande (EPG)

Para la salida sus 5 términos lingüísticos para el PWM son:

- PWM Negativo Grande (PWMNG)
- PWM Negativo Pequeño (PWMNP)
- PWM Cero (PWMC)

- PWM Positivo Pequeño (PWMPP)
- PWM Positivo Grande (PWMPG)

**Fusificación:** En esta etapa se evalúan las funciones lineales propuestas para el error, donde se toma el error actual obtenido del sensor con el valor anterior del mismo.

**Mecanismo de inferencia y reglas de inferencia:** Para esta etapa se utiliza el método de Modus Ponens, utilizado para evaluar reglas de tipo SI-ENTONCES, que son dadas por un experto en el sistema, para realizar conclusiones parciales, en este caso, las reglas para el sistema se observan en la Tabla 2.

Tabla 2: Reglas: Conclusiones parciales

Si ENG	entonces PWMNG
Si ENP	entonces PWMNP
Si EC	entonces PWMC
Si EPP	entonces PWMPP
Si EPG	entonces PWMPG

Dichas conclusiones en programación, se representa mediante una disyunción refiriéndose a la toma de un mínimo de los valores de nuestras funciones, pero para generar la conclusión final del control, se utiliza la unión de las conclusiones parciales utilizando el valor máximo entre cada una de ellas.

**Defusificación:** Para obtener la curva de control del sistema, se utiliza el método del centroide basándonos en su metodología para obtener los datos deseados en términos matemáticos con base a los términos lingüísticos dados.

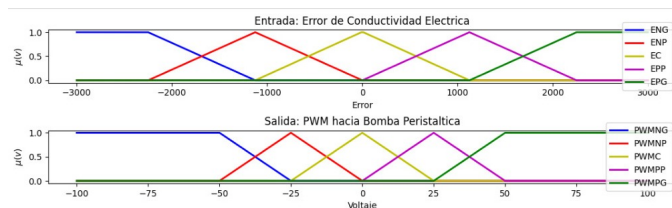
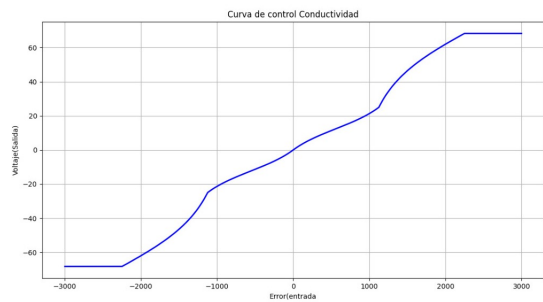


Figura 5: Funciones de entrada y salida de la conductividad eléctrica

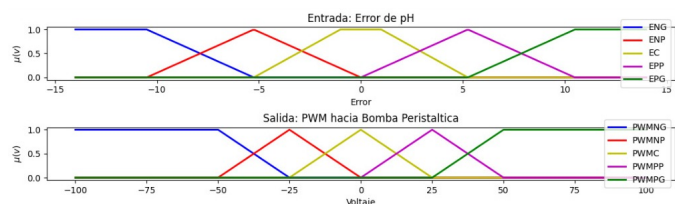
### IV.3. Circuito de conexiones

Para el diseño del circuito de conexiones, se utilizaron los siguientes sensores:

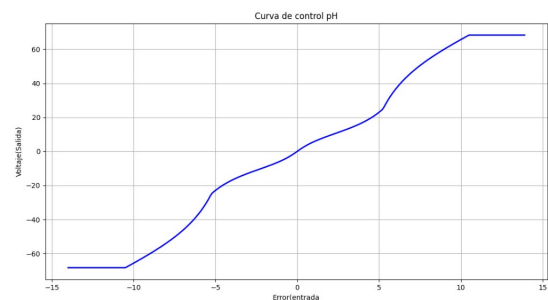
- Sensor de humedad (Dht11)
- Sensor de niveles de potencial de hidrógeno (PH-4502C)
- Sensor de conductividad eléctrica (TDS meter v1)
- Sensor de temperatura de líquidos (DS18B20)



**Figura 6:** Curva de control para las bombas peristálticas del suministro de elevador y reductor de pH



**Figura 7:** Funciones de entrada y salida del pH



**Figura 8:** Curva de control para las bombas peristálticas del suministro de solución nutritiva y pH

Para la conexión inalámbrica se utilizó una Raspberry Pi 3 modelo B+ y un microcontrolador ESP32.

El microcontrolador ESP32 realiza la manipulación total de los actuadores del sistema como lo es:

- El control de las bombas peristálticas, estas suministran los nutrientes para el control del pH y conductividad eléctrica en la solución nutritiva.
- El encendido y apagado de la bomba eléctrica y del agitador de agua.
- La obtención de datos generados por los sensores analógicos de pH, temperatura del agua, humedad en el ambiente y de la conductividad eléctrica.

Las conexiones se muestran en la Figura 9.

#### IV.4. El Internet de las Cosas en el sistema

El IoT en la hidroponía ha sido de suma importancia, para la visualización de parámetros respecto a los senso-

res que cuenta el sistema, por lo tanto, para la aplicación de las mismas, se realizó un broker-servidor utilizando la metodología mosquito y el protocolo de mensajería MQTT. Dicho servidor, muestra la suscripción y publicación de datos en tiempo real, sobre los valores que se obtienen de los 4 sensores, todo esto, mediante la suscripción al servidor utilizando la Raspberry Pi y la publicación de los datos obtenidos de la conexión inalámbrica con el ESP32.

#### IV.5. Monitoreo de germinación de la planta

##### Germinación

La germinación de la planta en el caso de la investigación se optó con dos tipos de plantas: lechuga y cilantro, las cuales fueron plantadas con una combinación de sustratos de 1/4 de Vermiculita exfoliada, 1/4 de Perlita y 2/4 de tierra negra, donde dichas plantas fueron sometidas a 3 métodos diferentes de germinación:

- Método 1. Es el método clásico de germinación al colocar en semilleros las semillas de las dos plantas directamente al sustrato y suministrando agua constante y otra con una solución nutritiva.
- Método 2. Es un método que consta en un recipiente profundo en el cual se encuentra el agua y las plantas directamente.
- Método 3. Este método consta de humedecer antes y después el sustrato en los semilleros para después colocar un manto húmedo por encima cubriéndolo del exterior y dejándolo reposar por 3 días.

##### Monitoreo

Para el monitoreo se utilizó el lenguaje de programación Python y sus librerías de OpenCV, realizando la captura de video en tiempo real utilizando una cámara web, que se encuentra orientada hacia los semilleros donde se realizó un método de segmentación, primeramente para un mejor manejo del video se optó en el cambio de escala de color de BGR a un HSV.

Después se aplicó una máscara de valores para observar la tonalidad de verde que se encuentra en el semillero al generar una binarización y después la segmentación al tomar los valores de verde que se detecten dentro de la zona, y así realizar capturas cada día para observar el crecimiento de las plantas. El trabajo se puede observar en la Figura 10.

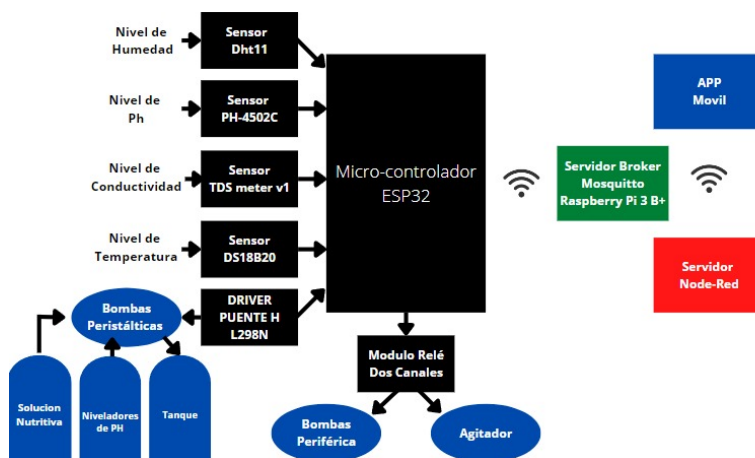


Figura 9: Modelo del circuito de conexiones



Figura 10: Segmentación de la germinación de las plantas

```

Temperatura de la solución:27.83°C
Humedad en el ambiente:50.547%
Conductividad eléctrica:1205.486us/cm
Potencial de hidrogeno:6.38Ph

Temperatura de la solución:26.401°C
Humedad en el ambiente:45.141%
Conductividad eléctrica:1236.988us/cm
Potencial de hidrogeno:6.125Ph

Temperatura de la solución:26.84°C
Humedad en el ambiente:46.567%
Conductividad eléctrica:1275.444us/cm
Potencial de hidrogeno:7.068Ph
    
```

Figura 11: Publicación de datos en el broker mosquitto

## V. Implementación y resultados

### V.1. Implementación del Controlador Difuso

Para la implementación de controlador se utilizaron los valores lingüísticos de entrada establecidos en la *Sección IV.2 Lógica difusa*, estos términos son utilizados de dos formas: para la conductividad eléctrica en valores de error entre [-3000,3000] y de pH con valores de error entre [-14,14].

La salida del PWM es la misma para las dos situaciones, esta está dada con base en una escala de porcentaje de [-100,100] para después utilizar el método del centroide y obtener la curva de control. Las funciones de entrada y salida se muestran en las figuras 5 y 7, y sus curvas de control en las figuras 6 y 8.

### V.2. Implementación de las IoT

El broker-servidor de mosquitto se implementó, con el motivo de utilizar el protocolo MQTT (Figura 11), donde se encuentran conectadas dos interfaces gráficas: una siendo un servidor en la red utilizando el entorno de desarrollo de Node-Red (Figura 12) y la otra siendo una aplicación móvil como se puede observar en la Figura 13, donde las interfaces reciben los datos enviados a través del ESP32 y así monitorean los parámetros que existen en el sistema hidropónico con base en la solución nutritiva en la que se encuentra, dichos parámetros son: la temperatura, la humedad, la conductividad eléctrica y el pH.

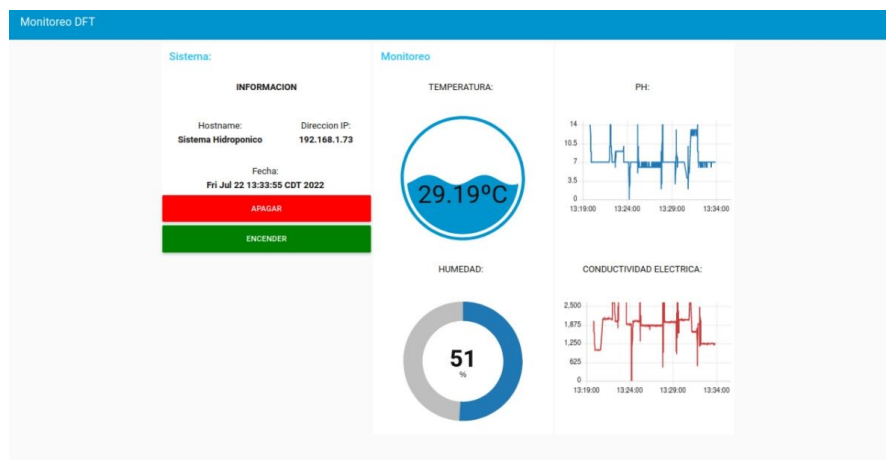


Figura 12: Publicación de datos en el servidor node-red

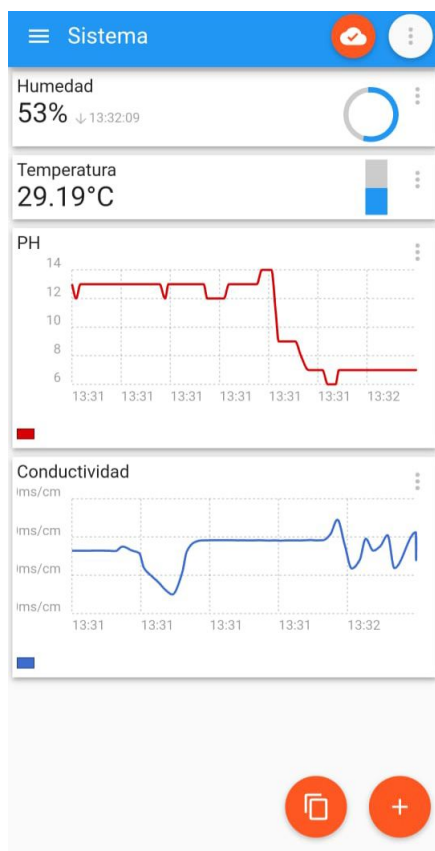


Figura 13: Publicación de datos en la aplicación móvil

## VI. Conclusiones y trabajo futuro

La agricultura es una de las demandas de gran impacto en la economía del país. Ahora bien, conociendo las nuevas técnicas agrícolas, como lo es el caso de la hidroponía, permite que la producción de cosecha aumente significativamente.

Hoy en día, las tecnologías aumentan y las innovaciones se aprenden, al grado de implementar nuevos métodos, como lo es la automatización de estos sistemas y así mismo la aplicación del IoT. Este permite tener una comunicación con los sembradíos del sistema, al poder observar y determinar sus condiciones ambientales y su entorno, dicho esto, se logró desarrollar un controlador difuso para automatizar el sistema y también la aplicación del IoT para realizar el monitoreo de los sembradíos.

Además de crear un servidor y una aplicación móvil para observar los parámetros, gracias al protocolo de mensajería MQTT, que fue de gran ayuda para la interacción de mensajería entre dispositivos.

Respecto al trabajo futuro se toma como referencia ciertas tareas, primeramente la validación completa del sistema de control difuso dentro de la solución nutritiva, además de generar diferentes fórmulas nutricionales de pruebas, para el crecimiento de las plantas, la integración de los sensores dentro del sistema hidropónico DFT, así como la validación del esquema de sensado remoto y por último ampliar el rango de cultivos utilizados para este sistema.

## Referencias

- [1] World Bank. *Agricultura, valor agregado (% del PIB)*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS>. [Online; Accedido 14/Mayo/2022]. 2020.
- [2] Sagar J Dholwani y col. «Introduction of Hydroponic system and it's Methods». En: *International Journal of Recent Technology Engineering* 3.3 (2018), págs. 69-73.
- [3] Manav Mehra y col. «IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks». En: *Computers and electronics in agriculture* 155 (2018), págs. 473-486.

- [4] Mark L Tenzer y Nicholas C Clifford. «A Digital Green Thumb: Neural Networks to Monitor Hydroponic Plant Growth». En: *2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*. IEEE. 2020, págs. 1-6.
- [5] Adnan Rafi Al Tahtawi y Robi Kurniawan. «Kendali pH untuk sistem IoT hidroponik deep flow technique berbasis fuzzy logic controller». En: *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer* 8.4 (2020), págs. 323-329.
- [6] Nivesh Patil y col. «Monitoring of Hydroponics System using IoT Technology». En: *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 7.6 (2020), págs. 1455-1458.
- [7] Usman Nurhasan y col. «Implementation IoT in System Monitoring Hydroponic Plant Water Circulation and Control». En: *Int. J. Eng. Technol* 7.4.44 (2018), pág. 122.