



Diseño e implementación de un sistema de adquisición y registro de señales e imágenes con tecnología IoT para el seguimiento de las condiciones de cultivos hidropónicos de lechuga

Guillermo Hernando Torres Cortés

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
MAYO DE 2021

Diseño e implementación de un sistema de adquisición y registro de señales e imágenes con tecnología IoT para el seguimiento de las condiciones de cultivos hidropónicos de lechuga

Guillermo Hernando Torres Cortés

Trabajo de grado para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Electrónica

Director:

Ing. Javier Alberto Chaparro Preciado PhD.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C.

MAYO DE 2021

Nota de aceptación:

La tesis de maestría titulada “Diseño e implementación de un sistema de adquisición y registro de señales e imágenes con tecnología IoT para el seguimiento de las condiciones de cultivos hidropónicos de lechuga”, presentada por Guillermo Hernando Torres Cortes, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Electrónica con énfasis en Automatización.

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director de tesis

Bogotá, mayo de 2021

Dedicatoria

A mis hijos Guille y Joseph, regalos de Dios y hermosa inspiración.

Agradecimiento

A Dios por la vida y el propósito que puso en ella. Agradezco a mi familia, pero en especial a mis padres Guillermo y Margarita, por esforzarse en brindarme un hogar y las mejores condiciones para el logro de mis objetivos.

Doy gracias a mi director de proyecto, el ingeniero Javier Chaparro por su comprensión amabilidad y conocimiento aportado durante la construcción de este proyecto, también al ingeniero Hernán Paz por su compromiso con la dirección de la maestría, creyendo en sus estudiantes, brindando su comprensión, y siendo mediador en todo el proceso. Agradezco también al ingeniero David Pachón asesor experto en el tema de IoT y a el ingeniero Adrián Largo.

A mis amigos, pero en especial a Camilo Moreno, David Urrea, Fernando Miranda y Cecilia Ibarra Z. Quienes impulsaron motivaron, participaron y oraron a Dios, alegrándose mutuamente en cada paso dado y logro obtenido para conseguir este objetivo. A Nataly, amada compañera de viaje quien ha aportado en muchos aspectos no solo a este proyecto, sino a mi vida en general.

A todos muchas gracias

Resumen

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en su Decanatura de Ingeniería Electrónica, adelanta investigaciones en el campo de la agricultura de precisión; uno de sus proyectos en desarrollo es la automatización utilizando técnicas de inteligencia artificial para un cultivo hidropónico en pirámide. Este proyecto se enfocó en el diseño e implementación de un sistema de adquisición y registro de señales e imágenes con tecnología IoT para el seguimiento de las condiciones de caudal, temperatura, conductividad, iluminación, humedad y CO₂ de cultivos hidropónicos de lechuga.

La metodológica utilizada en este proyecto fue la de validación de instrumentos, la cual permitió la verificación del funcionamiento correcto del sistema mecánico diseñado y la toma de fotografías a través del uso de la SBC Raspberry Pi3. De igual forma, se validó la captura de datos por medio de los sensores conectados al SoC (system on chip) ESP32, quien transmitió los datos a la plataforma Ubidots, de la cual se pudieron obtener los correspondientes *dataset*.

Este proceso permitió lograr la interoperabilidad de los distintos sensores al transmitir esta información hacia la plataforma de IoT para su posterior procesamiento; los resultados obtenidos permitieron hacer los ajustes correspondientes para que el sistema funcionara de la manera deseada, concluyendo que el uso de estos sistemas trae grandes beneficios que ayudan a conocer y procesar de manera remota las condiciones del cultivo hidropónico

Palabras clave: IoT, Interoperabilidad, Transmisión, Procesamiento.

Contenido

Nota de aceptación:.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento.....	5
Resumen	6
Contenido.....	7
Lista de Figuras.....	10
Lista de tablas	12
1 Preliminares	13
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos del proyecto.....	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 Estado del arte	16
2 Marco teórico.....	21
2.1 ¿Qué es un cultivo hidropónico? ¿Cuáles son sus características?	21
2.1.1 Técnicas de cultivos hidropónicos.....	22
2.1.2 Importancia de los cultivos hidropónicos	25
2.1.3 ¿Cuáles son las condiciones químicas óptimas para el cultivo hidropónico de lechuga?.....	25

2.1.4 Sistema hidropónico NFT configurado en pirámide.....	26
2.2 Tecnologías de adquisición de datos en agricultura.....	27
2.2.1 Sensores electrónicos para la agricultura	29
2.3 El Internet de las cosas	29
2.3.1 Protocolos de comunicación	30
2.4 Compilador de programación MicroPython.....	31
2.5 SoC ESP32	32
2.6 Computadores de placa reducida (Single Board Computer, SBC)	33
2.7 Cámaras infrarrojas para la recolección de datos en agricultura.....	34
2.8 Plataforma IoT Ubidots (broker).....	35
3 Procedimiento.....	37
3.1 Diseño sistema mecánico para traslado automático de cámara.....	37
3.1.1 Sistema mecánico para toma de imágenes.....	37
3.1.2. Control del sistema mecánico	40
3.1.3 Sistema de captura de imágenes y coordinación de posición	41
3.1.4 Acoplamiento tarjeta Raspberry a tarjeta de potencia y motor dc	44
3.1.4 Sistema de sensores para fluido nutritivo y ambiente.....	46
3.2 Diseño de software.....	53
3.2.1 Requerimientos funcionales y no funcionales.	53
3.2.2 Sistema de adquisición de datos (SAD) con ESP32	53

3.2.3 Control remoto de la cámara infrarroja (CRCI)	54
3.2.4 Funcionamiento del sistema de comunicación.....	55
4 Pruebas	63
4.1 Diseño experimental.....	63
4.1.1 Tipo de investigación.....	63
4.1.2 Fuentes de información	64
4.1.3 Técnicas de recolección de información	64
4.1.4 Análisis de datos.....	66
5 Conclusiones	69
Referencias.....	70
Anexos.....	73
A Presupuesto.....	74
B Programa de captura de datos de sensor con ESP32	76
C Programa de coordinación de movimiento y captura de imágenes	84
D. Manual de usuario.	90
E. Procedimiento calibración de sensores.....	93

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Especificaciones de dispositivo para sembrado hidropónico.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. Sistema de Farm Bot agricultura de código abierto cnc.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3. Sistema de brazo robótico ironox.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4. Técnicas hidropónicas.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5. Sistema hidropónico de flujo y reflujó.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6. Sistema hidropónico de aeroponía.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7. Sistema hidropónico de mecha o pábilo</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8. Sistema hidropónico de película nutritiva</i>	<i>24</i>
<i>Figura 9. Sistema hidropónico NFT configurado en forma de pirámide</i>	<i>27</i>
<i>Figura 10. Imágenes infrarrojas de cultivos</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11. Arquitectura propuesta para el internet de las cosas</i>	<i>30</i>
<i>Figura 12. Imágenes infrarrojas sobre cultivos de arándanos</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13. Broker</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14. Sistema mecánico para la toma de imágenes</i>	<i>37</i>
<i>Figura 15. Soporte de sistema</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16. Brazo móvil.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 17. Motorreductor.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 18. Diagrama de flujo del accionamiento mecánico</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19. Módulo cámara infrarroja Raspberry pi3 pi rev 1.3.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 20. Tarjeta Raspberry pi3 b+.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21. Conexiones Raspberry pi3 y tarjeta L298 y motor DC.....</i>	<i>44</i>

<i>Figura 22. Imágenes logradas con la cámara infrarroja sobre el prototipo.</i>	45
<i>Figura 23. Sensor caudal instalado</i>	46
<i>Figura 24. Placa de características técnicas bomba impulsora</i>	47
<i>Figura 25. Sonda de temperatura y sensor de conductividad</i>	48
<i>Figura 26. Sensor de CO2 instalado</i>	49
<i>Figura 27. Gráficas de calibración para censo Mq135</i>	50
<i>Figura 28. Sensor de luminosidad instalado</i>	51
<i>Figura 29. Sensor de humedad instalado</i>	52
<i>Figura 30. Algoritmo diseñado para el servicio prestado por el broker en el SAD</i>	55
<i>Figura 31. Suscripción a tópicos “switch” y “tiempo</i>	57
<i>Figura 32. Publicación de mensaje a través del tópico ESP32</i>	57
<i>Figura 33. Ejemplo de un mensaje JSON enviado al API de Ubidots.</i>	58
<i>Figura 34. Variables y valores organizados en la plataforma Ubidots</i>	58
<i>Figura 35. Gráfica y datos de la variable temperatura</i>	59
<i>Figura 36. Icono de la variable</i>	60
<i>Figura 37. Gráfica y tabla de datos online de uno de los sensores</i>	60
<i>Figura 38. Cuadro de configuración para descarga de dataset</i>	61
<i>Figura 39.. Prototipo de sistema hidropónico en funcionamiento</i>	64
<i>Figura 40. Dataset generados en la toma de datos</i>	65
<i>Figura 41. Botón de activación cámara</i>	66
<i>Figura 42. Imágenes de respuesta de los sensores durante el tiempo</i>	67
<i>Figura 43. Imágenes capturadas en las caras del prototipo.</i>	68

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Composición de fluido nutritivo en el cultivo de lechuga.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2. Comparación de especificaciones tarjetas SBC</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3. Requerimiento de iluminación para el cultivo de lechuga</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4. Sensores empleados y sus protocolos.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 5. Dataset obtenido</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 6. Dataset: valor de la variable y tiempo del muestreo.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 7. Presupuesto.....</i>	<i>74</i>

1 Preliminares

1.1 Planteamiento del problema

Existen problemas medioambientales relacionados con las prácticas convencionales en la agricultura. Sobre el tema, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) menciona que más de la tercera parte de las tierras productivas se destinan a actividades de cultivo y que “casi dos terceras partes del agua utilizada por el hombre se destinan a la agricultura. En Asia, la proporción aumenta hasta cuatro quintas partes” (FAO, 2002). De acuerdo con esta entidad, la producción agropecuaria genera grandes impactos en todo el sistema medioambiental y planetario en relación con el aire, el agua y la tierra. La producción agropecuaria contribuye en gran medida a la producción de gases de efecto invernadero (GEI) y los métodos pesqueros y forestales deterioran y destruyen la biodiversidad en el mundo. Todos estos aspectos, en su conjunto, generan consecuencias a mediano y largo plazo que pueden ser irreversibles.

Según el Natural Resources Defense Council, (Wei, 2013) en Chicago, el Programa Federal de Seguro de Cultivos indemnizó a los agricultores por más de USD10.000 millones debido a las pérdidas agrícolas causadas por la sequía y las altas temperaturas. Aunque se han implementado planes para mejorar el uso del suelo y el agua, estas cifras indican la necesidad de fortalecer el desarrollo de prácticas más inteligentes que contribuyan a la reducción de factores de riesgo.

Existen también en el contexto colombiano una serie de problemáticas que afectan la producción agrícola; desde sequias, dificultades con la comercialización de alimentos, subsidios restringidos en casos de inundaciones o desastres naturales; hasta factores que tienen que ver con la falta de inversión en procesos de tecnificación. Sobre el tema, la Dirección de Seguimiento y Evaluación de Políticas Públicas del Departamento Nacional de Planeación (DNP) afirma que al año se pierden seis toneladas de alimentos. (DNP, 2016)

La anterior problemática está directamente relacionada con el uso inadecuado del suelo. Se sabe que la capacidad productiva de la tierra se ve afectada por la ganadería y la falta de implementación de planes de manejo en procesos de labranza; aspectos que determinan la liberación de carbono a la atmósfera:

Las zonas con mayor concentración de carbono orgánico resultan ser las que albergan grandes desarrollos agrícolas y pecuarios, con problemas de sobreutilización en ciertas zonas. Estos suelos,

al contar con impactos derivados de la mano del hombre como la deforestación, cambio de uso y erosión, se pueden convertir en emisores o fuentes de gases de efecto invernadero (IGAC, 2017). Se reconoce entonces que, de continuar con las prácticas tradicionales agropecuarias y agrícolas que afectan el suelo, la calidad del aire y las fuentes subterráneas debido al uso de plaguicidas, insecticidas o fertilizantes, los costos ambientales a escala micro y macro puede ser muy altos. En este escenario y con el ánimo de contribuir a la reducción de los factores de contaminación ambiental, se han generado distintos tipos de prácticas, como por ejemplo el uso *de cultivos de cobertura*, técnica que consiste en cultivar plantas que permiten mejorar la salud del suelo. No obstante, esto obliga a una mayor utilización de terreno, pues mientras este se recupera no es productivo, y, por lo tanto, hay que tener otras áreas que sí lo sean.

Existe también la *agricultura sin labranza*, la cual permite aprovechar los rastrojos del cultivo anterior, y al sembrar sobre ellos se genera un manto que ayuda a mantener la humedad del suelo. Este tipo de práctica puede favorecer la aparición de plagas o un intercambio deficiente entre el suelo y el aire. Otra técnica consiste en utilizar una programación de *riego mejorada*, pero esta requiere un monitoreo constante para verificar la salud del cultivo.

Otra técnica es la hidroponía, muy utilizada actualmente para el sembrado de hortalizas como la lechuga. Este es un tipo de cultivo que presenta como principales ventajas el aprovechamiento del agua y del espacio, aspectos que, como se mencionó al inicio, son factores esenciales en la ecuación del deterioro ambiental.

En la hidroponía, la alimentación de la planta se realiza a través de un fluido nutritivo que resulta de diluir distintos componentes en el agua, procurando mantener ciertas medidas y condiciones durante el desarrollo del cultivo, pues de no ser así, se pueden presentar problemas en las plantas. Estos pueden ser evidentes en la coloración, el tamaño y el tiempo de desarrollo; y sus consecuencias pueden ser tan críticas como para generar la aparición de plagas y ocasionar finalmente la muerte y pérdida del cultivo.

Teniendo en cuenta la necesidad de adquirir información de cultivos hidropónicos de especies como las hortalizas, principalmente la lechuga, y con el propósito de disponer de *dataset*, para el posterior diseño de sistemas de control apoyados en la tecnología IoT (Internet of Things) o internet de las cosas para su supervisión; en este trabajo se diseñó y probó un sistema de adquisición y registro de variables ambientales y del fluido nutritivo, los cuales afectan

directamente la calidad de los cultivos; también se diseñó un mecanismo que nos facilitó la toma de un registro fotográfico a cada una de las dos caras de la pirámide hidropónica.

Todo lo anterior sustenta la necesidad de usar una tecnología apropiada para monitorear de la manera más instantánea y precisa posibles condiciones físicas como la velocidad, temperatura y conductividad del fluido nutritivo y también factores ambientales como la luz, la temperatura, la humedad y el CO₂. Lo anterior, tomando en cuenta que el abastecimiento adecuado de nutrientes ya sea en cantidad o en composición, puede evitar daños en el metabolismo de la planta.

Cabe anotar que este proyecto también contribuye a la dotación del Laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, con un sistema de registro de variables para cultivos hidropónicos, orientado a desarrollar posteriormente sistemas automatizados inteligentes.

1.2 Justificación

La utilización de sistemas IoT permite la recolectar datos y crear *dataset* para una rápida visualización en tiempo real, desde cualquier punto del planeta a través de la red de internet. Esto facilita la toma de decisiones ante la pronta detección de una situación no favorable, lo cual se verá reflejado en ahorro de tiempo y recursos.

El desarrollo de este proyecto es un importante aporte para el uso académico e investigativo que estimulara posteriores desarrollos no solo en el campo de la agrónoma sino en distintas áreas que lleguen a necesitar este sistema de monitoreo.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

Diseñar, implementar y probar un sistema de adquisición y registro de señales e imágenes para la caracterización de las condiciones de cultivo, implementado en un sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) en forma de pirámide con tecnología IoT.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar el estado del arte de las tecnologías que se utilizan actualmente para el mejoramiento de la producción de cultivos en cuanto a nutrición y condiciones medioambientales.
2. Diseñar e implementar el sistema electrónico adecuado para procesar las variables físicas, ambientales e imágenes en un sistema de cultivo hidropónico.
3. Capturar con una cámara imágenes infrarrojas de las plantas, diseñando un mecanismo de desplazamiento.
4. Determinar el sistema electrónico para la transmisión de datos vía wifi teniendo en cuenta las especificaciones y los protocolos que maneja que esta tecnología.
5. Desarrollar una aplicación en un servidor comercial de IoT para almacenar y visualizar las variables registradas del cultivo.

1.4 Estado del arte

La automatización en el agro, más conocida como agrónica, agromática o agricultura de precisión, consiste en aplicar técnicas y principios de electrónica, mecatrónica e informática con el fin de modelar, monitorear y controlar los procesos agropecuarios.

Se han desarrollado sistemas similares de agrónica o agromática en el país, como por ejemplo el trabajo de (Rojas, 2017) “Diseño e implementación de un sistema automatizado para invernadero hidropónico” generado con el objetivo de “Implementar un sistema en el cual se supervisen y controlen las variables de temperatura, humedad, luminosidad, CO₂ y Ph, desarrollándolo en un cultivo hidropónico que garantice la supervivencia de la planta”, apoyado en el computador de placa reducida Arduino.

“La idea de un invernadero hidropónico automatizado ofrece muchos beneficios, uno de ellos es el desarrollo de un entorno favorable para cualquier cultivo que se acomode al sistema de nutrición a través de la raíz” (Rojas, 2017). Este proyecto se implementó con éxito, sin embargo, entre las recomendaciones se plantea la necesidad de optimizar los resultados a través de la implementación de “un sistema de acceso remoto que permita tener conocimiento de las variables del invernadero desde cualquier parte del mundo”, esto justifica la importancia del desarrollo de tecnologías IoT en estos campos.

Por otra parte, es posible referenciar la investigación: “Diseño de una Solución IoT para Monitoreo de las Condiciones Óptimas de un Cultivo Hidropónico de Flores en Invernadero” (Briceño Jegen & Cubides Porras, 2020). Este sistema, basado en IoT, permitió identificar y monitorear las principales condiciones ambientales implícitas en el proceso de producción del producto, mientras se utilizó un sistema embebido. La investigación permitió reconocer las variables mínimas de los cultivos monitoreados por IOT, obtener sugerencias de sensores y embebidos, también, establecer un Framework conceptual, fundamentado en el modelo TCP/IP.

En Latinoamérica específicamente en la provincia del Guayas en Ecuador se realizó la investigación titulada “Desarrollo de una Solución Basado en Internet de las Cosas (IoT), a través de Sensores Aplicados a un Sistema de Hidroponía, en la Provincia del Guayas.” (Catagua Vazquez & Kozisck Luque, 2021). Dicho trabajo permitió desarrollar una plataforma web con el objetivo de: “recibir los valores obtenidos de la lectura de los sensores (niveles de temperatura, humedad, etc.) implementados en los cultivos”, almacenar la información en un repositorio de datos y permitir el control y monitoreo del cultivo a través de la visualización de los datos mediante una interface amigable y ágil. Esta tesis permitió reconocer las condiciones en que se encontraba el sistema de sembrío según determinados intervalos de tiempo establecidos para hacer la lectura de los sensores, y tomando en cuenta los valores históricos para su análisis. En la tesis de comprueba que el uso de la plataforma Arduino y los sensores seleccionados, permitieron el desarrollo de este sistema para el control y monitoreo en un prototipo de cultivo hidropónico.

Por otro lado, se encuentra en España la investigación “Diseño de una Arquitectura IoT para el Control de Sistemas Hidropónicos” (Hinojosa Pinto, 2019). En esta se buscó desarrollar “un sistema capaz de monitorear los datos del cultivo (niveles de temperatura, Ph, humedad, etc) permitiendo al hidroponicultor saber en qué condiciones se encuentra su cultivo de manera tal que pueda tomar decisiones para optimizar el rendimiento y calidad de su cosecha. Este trabajo plantea dentro de sus conclusiones la necesidad de instalar electroválvulas que se abran para añadir a la solución los nutrientes cuando los niveles estén por debajo de lo requerido

Ahora bien, con respecto al desarrollo de proyectos e innovaciones, se puede referenciar la empresa sueca botanium, quien desarrolla actualmente sistemas hidropónicos reducidos para uso casero (Figura 1) los cuales consisten en un medio de cultivo hecho de agregado de arcilla expandida ligera, (llamado LECA) que retiene el aire y la humedad, convirtiéndolo en un medio excelente para que las raíces crezcan. Es una sembradora de riego automático de diseño

minimalista como se puede observar en la Figura 1, permite cultivar hierbas y verduras utilizando tecnología de cultivo sin suelo.

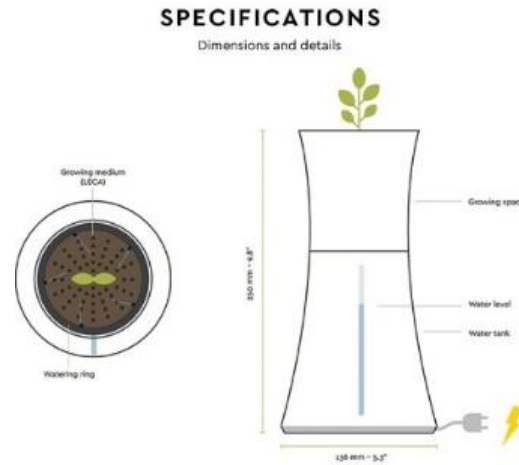
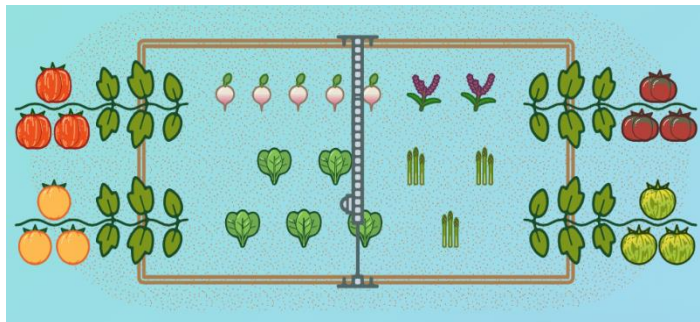


Figura 1. Especificaciones de dispositivo para sembrado hidropónico

Fuente: (Botanium, 2021)

El dispositivo para sembrado hidropónico tiene ventajas como el diseño compacto y el poco espacio que utiliza. Sus limitaciones radican en que no usa dispositivos que puedan censar la calidad del fluido nutritivo, y está sujeta a la cantidad de luz del lugar donde se le ubique, además no posee sistemas de censado que permitan conocer las características actuales de los nutrientes.

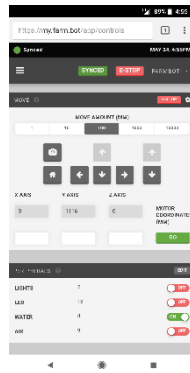
Por otra parte, el proyecto de agricultura Farm Bot brinda opciones de siembra que pueden ser muy interesantes. El sistema funciona basado en código CNC, que ubica las semillas en lugares precisos utilizando una aplicación de interfaz gráfica de fácil predicción y comprensión que ejecuta instrucciones en tiempo real.



(a) Visualizador gráfico



(b) brazo mecánico



(c) Panel de interacción.

Figura 2. Sistema de Farm Bot agricultura de código abierto cnc.

Fuente: (FarmBoot, 2021)

Entre las cualidades del sistema (Figura 2) se encuentra la posibilidad de operar las herramientas y periféricos ubicándolos de una manera gráfica sencilla, (Figura 2a) transmitiendo las ordenes por medio de un brazo robótico (Figura 2b) interactuando por medio de una interface grafica. (Figura 2c) “Asusta a las aves mientras estás en el trabajo, toma fotos de tus verduras, enciende las luces para una cosecha nocturna”.

Las limitantes de Farm Bot están en que no posee un sistema de interacción directo con el terreno donde se encuentra cultivada la planta. Este factor podría ser decisivo en las acciones que se tomen sobre el cultivo. La configuración de ubicación y disposición del cultivo está limitada a terrenos planos y agricultura convencional, descartando las opciones de cultivos hidropónicos.

Ironox es otra empresa que realiza cultivos apoyados en la interacción de robots (Figura 3), que se encargan de sembrar, trasladar y nutrir de manera hidropónica ubicando las plantas, con el fin de aprovechar factores como la luz solar. Sobre el tema (Ironox, 2021) plantea: “Nuestro proceso de cultivo adopta un enfoque humano-robótico, para garantizar que cada planta se cultive de la mejor manera desde la semilla hasta la cosecha”.



Figura 3. Sistema de brazo robótico ironox

Fuente: (Ironox, 2021)

Aunque requiere poca supervisión humana en campo, el limitante actual de este sistema es la implementación de infraestructura, pues además de utilizar un amplio espacio es altamente costoso.

Otros de los sistemas apoyados con esta tecnología, es el desarrollado por Ryan Knop, cofundador de la empresa Root AI, quien construyó un invernadero moderno apoyado con robots que han sido entrenados a través de IA (inteligencia artificial) para recoger productos con la máxima frescura.

Su principal producto es un robot basado en inteligencia artificial y aprendizaje autónomo (Figura 3) que puede cosechar los productos sembrados en un cultivo. Su sistema de sensores es visual y puede determinar la madurez del fruto por recoger. De esta manera se aprovechan las características del producto en pos-cosecha.

Sus inconvenientes están en que no cuentan con procesos de mejora durante el proceso de siembra y desarrollo de la planta. Aun así, sus datos pueden ser utilizados para generar mapas informativos que, procesados posteriormente, permitan hacer predicciones y mejoras por medio de otras técnicas.

2 Marco teórico

A continuación, se presenta la definición de algunos conceptos que son valiosos para este proyecto con sus características más relevantes.

2.1 ¿Qué es un cultivo hidropónico? ¿Cuáles son sus características?

La hidroponía es un sistema de producción agrícola que permite el crecimiento de cultivos a través del suministro de elementos hídrico-nutricionales bajo condiciones controladas. Esto significa que la planta se encuentra sembrada en un medio inerte o en una solución acuosa conocida también como solución nutritiva, entre varias de las opciones. Esta forma de cultivo se conoce como cultivo hidropónico y permite un consumo de agua mínimo, eficiencia en el uso de los recursos y control de calidad del producto.

De acuerdo con, Giménez y Beltrano (Beltrano & Gimenez, 2015), existen macronutrientes y micronutrientes necesarios para el buen crecimiento y desarrollo de las plantas que deben ser suministrados bajo la forma de iones para que puedan ser absorbidos por la planta. Dentro del primer grupo se incluye: Calcio, Azufre, Fósforo, Magnesio, Nitrógeno y Potasio; y como parte del segundo: Boro, Cobre, Nickel, Zinc, Hierro y Molibdeno. También, en algunos cultivos hidropónicos, se utilizan diferentes sustratos que acompañan la solución nutritiva (arena, cascarilla de arroz, arcillas expansivas, carbones o poliestireno expansivo, entre otros).

Sumado a estos elementos, es necesario tomar en cuenta el factor del pH y la conductividad eléctrica (CE). Gran porcentaje de plantas cultivadas, requieren de condiciones ligeramente ácidas (rango de pH entre 5.8 y 6.5) para que sus elementos no se precipiten y se evidencien signos de su deficiencia. Sobre la conductividad eléctrica (entendida como la capacidad que tiene un sustancia o material, de conducir electricidad a través de él) Andreau (R., Gimenez, & Beltrano, 2015) plantean:

La CE se mide en S/cm² (donde S = Siemens, la unidad del sistema internacional para la conductancia, o mhos/cm. Esta nos da una idea de la cantidad de sales disueltas en la solución. La misma se debe mantener en un rango de 1.8 – 2.3 mmhos/cm. Si no se mantiene este balance puede afectar la disponibilidad de los nutrientes.

Por lo anterior, se entiende que para cada tipo de cultivo existe una combinación adecuada de nutrientes que permite lograr mejores resultados en materia de producción. A continuación, se

describen algunas de estas técnicas, como las que se ilustran en la Figura 4, para el desarrollo de cultivos hidropónicos:

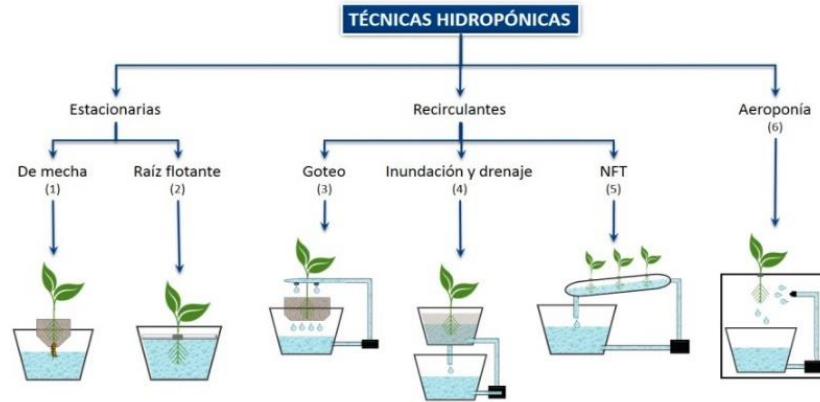


Figura 4. Técnicas hidropónicas

Fuente: (Cardador, 2017)

2.1.1 Técnicas de cultivos hidropónicos

2.1.1.1 Sistema Hidropónico de flujo y reflujo (Ebb & Flow)

Este se caracteriza por el llenado del recipiente donde se encuentra “sembrada” la planta hasta que haga contacto con sus raíces, como se puede observar en la Figura 5; luego, se desocupa a otro depósito, según conveniencia del cultivador. El principio de esta técnica consiste en incentivar la planta en periodos de carencia, ya que en un primer momento esta carecerá de oxígeno, y luego de nutrientes. Es una buena alternativa, siempre y cuando se puedan garantizar los dos momentos mencionados.



Figura 5. Sistema hidropónico de flujo y reflujo

Fuente: (Cardador, 2017)

2.1.1.2 Aeroponía

Este sistema permite el crecimiento de plantas en entornos cerrados total o parcialmente. En esta técnica las raíces se encuentran suspendidas en el aire y reciben el fluido nutritivo a través de nebulizadores o aspersores que humedecen las raíces de la planta en periodos regulares, dirigiendo el fluido nutritivo a las raíces y el bajo tallo. Los demás nutrientes son tomados del aire, de forma directa. (Figura 6)

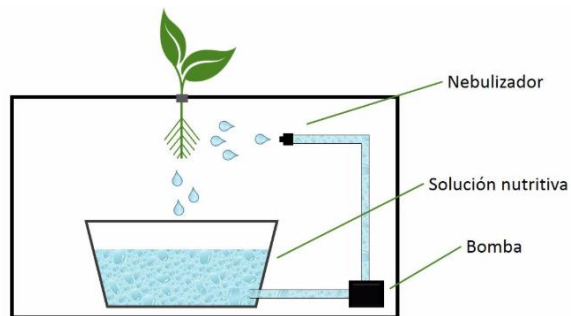


Figura 6. Sistema hidropónico de aeroponía

Fuente: (Cardador, 2017).

2.1.1.3 Sistema Hidropónico de mecha o pabito

Esta técnica es una de las más simples, ya que no requiere de bombas para transportar la solución nutritiva desde el depósito hasta los recipientes o bandejas de crecimiento. Como se observa en la

Figura 7, las plantas reciben la solución nutritiva mediante mechas o pabilos. El sistema de mecha es muy versátil y puede usar distintos tipos de sustrato, pero sólo puede usarse para plantas que requieren poca agua.

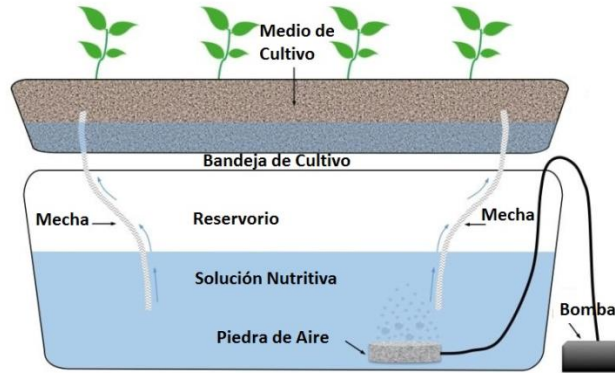


Figura 7. Sistema hidropónico de mecha o pábilo

Fuente: (Cardador, 2017)

2.1.1.4 Técnica de película nutritiva (NFT)

La NFT consiste en crear una película recirculante de solución nutritiva (Figura 8). Dado que el flujo de la solución es constante, no requiere de timers o contadores de activación, además de que generalmente no requiere de sustrato. La solución nutritiva es bombeada desde un depósito hacia bandejas de crecimiento o tubos de PVC con plantas, donde entra en contacto con sus raíces antes de regresar al depósito. Aunque este sistema hidropónico es uno de los más comunes, es muy sensible a fallos en las bombas y en la energía eléctrica.

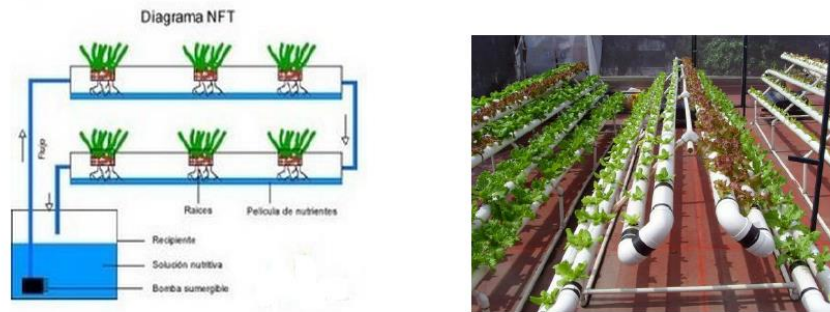


Figura 8. Sistema hidropónico de película nutritiva

Fuente: (Alveal Concha & Campos Gonzales, 2014)

2.1.2 Importancia de los cultivos hidropónicos

El paradigma alimentario basado en prácticas agrícolas tradicionales se ve afectado por múltiples factores que van desde la afectación de los suelos y la biodiversidad, sequías o inundaciones asociadas al cambio climático, contaminación de aguas subterráneas, entre otros. En este escenario, la optimización del espacio, el máximo aprovechamiento del agua y el control de nutrientes que permanecen dentro del sistema de cultivo -evitando su liberación al medio ambiente y reduciendo posibles desequilibrios biológicos-, hacen de la hidroponía, una gran alternativa para productores agrícolas.

La hidroponía entonces es una práctica que ha venido tomando más y más fuerza a nivel mundial y cuyos desarrollos tecnológicos pueden contribuir al desarrollo de hortalizas o productos de alta calidad y sanidad. De acuerdo con (Arcos B., Benavides, & Rodriguez, 2011):

En la última década, el área mundial, destinada a la producción hidropónica se ha incrementado considerablemente al pasar de 12000 ha en 1996 a 40000 en el 2008, destacándose México y Brasil como países hidropónicos con algo más de 2000 ha. (p. 96).

La lechuga es uno de los productos alimenticios que mayor demanda mundial presenta y cuyos procesos de producción han tenido gran acogida en los mercados nacionales e internacionales. Según (Arcos B., Benavides, & Rodriguez, 2011):

“Entre las técnicas de cultivo hidropónico utilizadas en hortalizas, los sistemas de cultivo sin suelo son una alternativa productiva para obtener hortalizas con alta calidad sanitaria, con mayores rendimientos y precocidad en relación con las cultivadas en suelo”. Esto hace posible contar con varias cosechas anuales con un promedio de 29 lechugas por m². (p. 97).

2.1.3 ¿Cuáles son las condiciones químicas óptimas para el cultivo hidropónico de lechuga?

La solución nutritiva es el elemento más delicado e importante dentro de los sistemas hidropónicos, el buen resultado depende en gran parte de las características químicas de la solución nutritiva, las cuales están encaminadas a satisfacer plenamente las exigencias de la planta. Ésta debe contener los nutrientes esenciales para lograr un buen desarrollo del cultivo y su composición dependerá de la especie, variedad, estado de desarrollo y parte aprovechada de la planta.

La temperatura que requiere la lechuga permite que se cultive especialmente en las regiones templadas y subtropicales. Así, esta hortaliza es un cultivo que se adapta mejor a las bajas temperaturas que a las altas. De acuerdo con (Saavedra, 2017) :

La temperatura óptima de crecimiento está entre 15 y 18°C, la mínima es de 12°C, bajo esta temperatura la planta no crece; y la máxima entre 18 y 24°C, temperaturas superiores producen deterioro de la lechuga por crear cabezas más sueltas y con tendencia a emisión de tallo floral o “subida”. Sin embargo, estas temperaturas son generales, cada tipo de lechuga, e inclusive variedad, tiene requerimientos propios de temperatura para su crecimiento (p.27).

La temperatura y la humedad son también factores importantes. El requerimiento de horas luz en la lechuga llega a ser de una intensidad de 8 watt m⁻² con una duración de 14 a 15 horas luz. Hee y Beom (HEE P & L., 2001) recomiendan una intensidad de luz de 200 a 300 μmol·m⁻² s⁻¹. Sobre la humedad, varios autores reconocen que debe existir una humedad relativa del 60 al 80 %, aunque puede tolerar humedades menores a 60 % (Maroto, 2000).

Para producir una tonelada de lechuga, se requiere 2 kg de nitrógeno, 0.5 kg de fósforo, 4.3 kg de potasio, 0.9 kg de calcio, 0.2 kg de magnesio (Ciampitti & O, 2008) En la tabla 1 se pueden observar algunas composiciones de nutrientes:

Tabla 1. Composición de fluido nutritivo en el cultivo de lechuga

Nutrimento (mg.L)	Shippers et al 1980	Ananda et al 2000	Premuzic et al 2006	Valverde et al 2009	Scuderi et al
N	205	198	252	190	212
NO ³	195	135	*	130	198
NH ²	10	63	*	60	14
P	50	70	54	35	57
K	210	228	312	210	234
Ca	190	143	169	150	170
Mg	30	30	48	45	40
S	39	117	65	70	48
Fe	3	1.5	0.35	1	*
Cu	0.06	0.03	0.32	0.1	*
Mn	0.5	0.3	0.78	0.5	*
Mo	0.1	0.005	0.35	*	*
Zn	0.08	0.03	0.48	1.15	*

Fuente: (Ciampitti & O, 2008)

2.1.4 Sistema hidropónico NFT configurado en pirámide

Existen varias técnicas para realizar cultivos hidropónicos. La que se trabajó en este proyecto se denomina Nutrient Film Technique (NFT), cuya configuración es en forma de pirámide. En esta

generalmente se utilizan tubos de PVC con orificios a lo largo, donde estarán “sembradas” las plantas por medio de una espuma absorbente. En los extremos van ubicadas unas tapas interconectadas por mangueras, como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Sistema hidropónico NFT configurado en forma de pirámide

Fuente: (Alveal Concha & Campos Gonzales, 2014)

Para hacer circular el agua o fluido nutritivo por todo el conjunto de tuberías se ubicó un sistema impulsor de líquido (bomba).

2.2 Tecnologías de adquisición de datos en agricultura

Para poder tomar decisiones adecuadas y conocer el estado actual de cualquier tipo de cultivo es necesario contar con datos que permitan conocer las variables que lo afectan, ya sea a escala nutricional, ambiental o de salud, estos se conocen como datos de agricultura.

Según el texto de la Universidad de Lleida (Universidad de Lleida, 2020), hay tres maneras de tomar datos en la agricultura: basados en mapas digitales de información, en la adquisición de datos por sensores en tiempo real, o fusionando las dos anteriores.

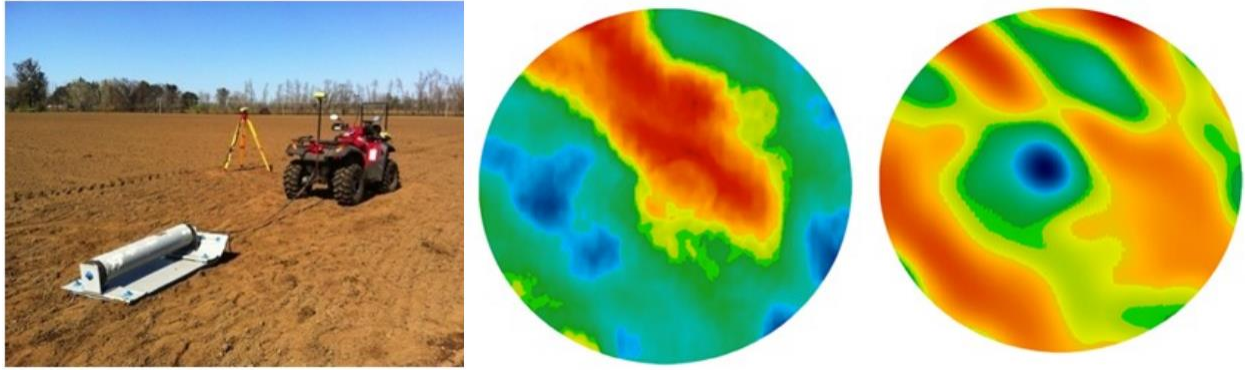


Figura 10. Imágenes infrarrojas de cultivos

Fuente: (Alveal Concha & Campos Gonzales, 2014)

El primer caso se logra mediante la construcción de mapas siguiendo un sistema de posicionamiento y navegación (GPS), caracterizándolo por un medio que examine las variables de interés. Se pueden lograr imágenes como la observada en la Figura 10.

Otra manera de obtener mapas es basándose en el principio de reflectancia de las plantas, lo cual puede ser captado por sensores multiespectrales ubicados en aviones o satélites o incluso captando las imágenes locales con cámaras infrarrojas o térmicas. “Este tipo de información se está utilizando ampliamente, ya que se han encontrado buenas correlaciones entre las producciones y la respuesta espectral de las plantas” (Best, Mendez, Flores, & Aguilera, 2014).

El segundo caso tiene que ver con la ubicación estratégica de sensores en el medio, campo o terreno por utilizar. Los datos se obtienen directamente de los sensores, motivo por el cual, no requiere usar sistemas GPS para su ubicación. Posterior a la toma de datos se pueden usar de la manera que la persona desee, bien sea para continuar, parar o controlar.

Y el tercer caso es la combinación de los dos anteriores. Permite obtener mayor cantidad de información, lo cual puede hacer que se tomen decisiones más apropiadas dependiendo de la intención del cultivador.

En el caso de la hidroponía, se utiliza principalmente la segunda técnica, pues los sensores se ubican en partes específicas del sistema y la homogeneidad de la solución que circula con los nutrientes depende del caudal y el intercambio con las plantas.

2.2.1 Sensores electrónicos para la agricultura

En la producción de lechugas o de cualquier otro tipo de hortaliza, ya sea de manera convencional o mediante hidroponía, es importante conocer la mayor cantidad de variables que pueden llegar a afectar el desarrollo de las plantas. Con este fin, se han desarrollado sensores electrónicos que permiten conocer datos de humedad, temperatura, conductividad eléctrica y CO₂, entre otros.

Estos sensores se basan en principios de funcionamiento por variaciones físicas y químicas que, al ser expuestas a cargas, se manifiestan normalmente en variaciones de voltaje y corriente; también responden a estímulos mecánicos como la deformación, la humedad en bulbo (sicrométrico), de efecto *hall*, capacitivos y piezoeléctricos, entre otros. (Fernandez, 2005) cada sensor varía su construcción de acuerdo con su utilización o uso dentro de la industria o en otra área.

Las cámaras infrarrojas son otro tipo de sensor que logran capturar las características visuales aprovechando otro espectro visual de la imagen; son efectivas también ayudando a supervisar el estado de la temperatura de las hojas en tiempo real, y sin generar estrés en la planta como ocurría con las técnicas tradicionales. Este tipo de mediciones son importantes pues existe una relación entre la temperatura y la transpiración que al saber interpretarla permite mejoras en los resultados de producción.

Las tomas multiespectrales, capturan imágenes del espectro infrarrojo además de la visual, estos se pueden combinar para crear una imagen de la cosecha destacando las diferencias entre las plantas sanas y enfermas que el ojo humano no ve a simple vista. (Juan José Díaz García, 2015).

2.3 El Internet de las cosas

El IoT o internet de las cosas se origina por la necesidad de comunicar la mayor cantidad de elementos o dispositivos con los usuarios por medio de internet. Esto tiene varias ventajas; una de ellas, y tal vez la principal, es facilitar la interacción remota. IoT posee una arquitectura de cinco capas (Figura 11) que, según (Rosero, 2017), se construyó según las necesidades de los investigadores y la industria.



Figura 11. Arquitectura propuesta para el internet de las cosas

Fuente: (Rosero, 2017)

La capa de objetos es sensible a la captura los estímulos e interacciones. Allí se ubican los sensores y actuadores, que son los que entregan información: temperatura, humedad, ubicación y movimiento, entre otras.

La capa de abstracción de objetos recoge la información digital entregada por la capa anterior y se encarga de transmitirla por medio de tecnologías de comunicación (GSM, UMTS, wifi, *Bluetooth*, etc.) para que pasen a la capa de gestión de servicios, encargada de conectarlos con su solicitante. Posteriormente, la capa de aplicación proporciona los servicios requeridos por el cliente, y la capa de negocios, que cubre todas las aplicaciones y servicios de gestión de IoT (Rosero, 2017).

2.3.1 Protocolos de comunicación

Los protocolos que se utilizan para la transmisión ordenada de información, en el internet de las cosas estos son variados y cada uno posee características importantes que se deben tener en cuenta según la función a cumplir.

2.3.1.1 Protocolo MQTT

El protocolo MQTT, creado en 1999 por el Dr. Andy Stanford-Clark de IBM y Arlen Nipper de Arcom (ahora Eurotech), se constituyó como un mecanismo para conectar dispositivos empleados en la industria petrolera. Se trata de un protocolo de conectividad máquina a máquina (M2M) diseñado como un transporte de mensajes extremadamente ligero, recomendado para escenarios

de red, en los cuales el consumo de ancho de banda debe ser reducido y donde los dispositivos involucrados en la comunicación tienen baja capacidad de procesamiento y de memoria.

Bajo este protocolo, los dispositivos pueden hablar entre sí de forma bidireccional, no existen dispositivos maestros y esclavos debido a que se trabaja sobre el paradigma de publicación/suscripción que se logra través del uso de tópicos organizados jerárquicamente. Los clientes inician una conexión TCP/IP con un bróker o servidor central, el cual mantiene un registro de los clientes conectados. Un cliente puede publicar un mensaje en un determinado tópico, otros clientes pueden suscribirse a este tópico y el bróker le hará llegar los mensajes suscritos. La conexión establecida entre los clientes y el bróker se mantiene abierta hasta que el cliente la finaliza. Por defecto, MQTT emplea el puerto 1883 y el 8883.

2.3.1.2 LoRaWAN

LoRa WAN es una especificación red de topología estrella sus características son el bajo consumo y largo alcance que resulta confiable por la utilización de bandas de *frecuencia dedicadas* que no se comparten con usuarios externos, y que presenta un alcance de 10 kilómetros en entornos abiertos, baja tasa de transferencia de datos y bajo consumo energético. (Modernell, 2021).

2.3.1.3 Protocolo ZigBee

ZigBee es un estándar, también utilizado en IoT, que define un conjunto de protocolos para el armado de redes inalámbricas de corta distancia y baja velocidad de datos (Dignani J. , 2011) Tiene características como: el ultra bajo consumo energético para su funcionamiento, bajo costo del dispositivo como del mantenimiento, un alcance no mayor a 50 metros, optimizado para ciclo efectivo de transmisión menor a 0.1 % y una velocidad de transmisión menor que 250 kbps. Típica: menor que 20 kbps.

2.4 Compilador de programación MicroPython

Es un compilador en tiempo real de ejecución completo de Python3 (ejecutable en la función de bare-metal). Presenta un indicador interactivo (el REPL) que permite ejecutar comandos e importar y ejecutar scripts desde el sistema de archivos incorporado. Además de implementar una selección de bibliotecas centrales de Python, Micro Python “incluye módulos como “máquina” para acceder a hardware de bajo nivel”. (Damien, 2021).

Este compilador es compatible con dispositivos como: PyBoard, Micro:Bit, Adafruit's Circuit Playground Express y las tarjetas para desarrollo de sistemas embebidos como con ESP8266/SP32 de Espressif.

2.5 SoC ESP32

Los SoC (System-on-Chip) son una de las tecnologías que integran varios módulos o sistemas normalmente utilizados en un computador personal llevándolos a un circuito integrado. El ESP32 es uno de ellos y tiene características como el bajo costo y consumo, Wi-Fi y Bluetooth de modo dual integrados. Este microcontrolador es un avance para los ingenieros de automatización que no quieren utilizar tecnologías de radiofrecuencia (RF) y diseño inalámbrico. Como una radio combinada Wi-Fi/Bluetooth de bajo costo, la serie ha ganado popularidad no solo entre los aficionados sino también entre los desarrolladores de IoT. Su bajo consumo de energía, sus múltiples entornos de desarrollo de código abierto y sus bibliotecas lo hacen adecuado para desarrolladores de todo tipo. Permite la instalación de MicroPython, RTOS, Mongoose OS, Espruino, e inclusive emplear el IDE de Arduino.

De acuerdo con (Espressif, 2021) el módulo ESP32 es una solución de Wi-Fi/Bluetooth todo en uno, integrada y certificada que proporciona no solo la radio inalámbrica, sino también un procesador integrado con interfaces para conectarse con varios periféricos. El procesador en realidad tiene dos núcleos de procesamiento cuyas frecuencias operativas pueden controlarse independientemente entre 80 megahercios (MHz) y 240 MHz. Los periféricos del procesador facilitan la conexión a una variedad de interfaces externas como:

- Interfaz periférica serial (SPI)
- I2C
- Transmisor receptor asíncrono universal (UART)
- I2S
- Ethernet
- Tarjetas SD
- Interfaces táctiles y capacitivas

El SoC ESP32 cuenta con los periféricos necesarios para integrar los sensores requeridos en este trabajo I2C, ADC, Onewire y además cuenta con las facilidades para conectarse vía Wifi a un access point y poder implementar el protocolo MQTT para la integración con la plataforma Ubidots.

2.6 Computadores de placa reducida (Single Board Computer, SBC)

Una tarjeta SBC (Single Board Computer) o Pc de placa única, es una placa de dimensiones reducidas que contiene todos o la mayor parte de los componentes de un computador. Al igual que una computadora convencional, posee memoria y puertos, y se le puede instalar un sistema operativo como por ejemplo Ubuntu, Raspbian, Fedora, etc. Esas tarjetas cuentan con puertos GPIO o pines de propósito general de entrada/salida que le permiten interactuar con otros dispositivos, sensores y actuadores, además de periféricos como I2C SPI. A diferencia de dispositivos MCU como Arduino o el ESP32, los SBC cuentan con un sistema operativo y pueden ser programados para la realización de diversas tareas de forma concurrente. Actualmente se pueden encontrar varios tipos de SBC: la Beagle Bone (Black), Arduino y la Raspberry pi3 fue la que se utilizó para este proyecto de acuerdo con sus características comparativas como se puede ver en esta tabla:

Tabla 2. Comparación de especificaciones tarjetas SBC

	Arduino Uno	Raspberry Pi3	BeagleBone Black
Procesador	ATMega 328	Arm11	AM335x
Velocidad	16 MHz	700 MHz	1 GHz
RAM	2 KB	512 MB	512 MB
USB	n/a	2	1
Audio	n/a	HDMI, Analógico	HDMI
Video	n/a	HDMI, Analógico	Mini-HDMI
Ethernet	n/a	10/100	10/101
I/O	14 GPIO, 6-10 bit analog	8 GPIO	69 GPIO, LCD, GPMC, MMC1, MMC2, 7 AIN, 4 temporizadores, 4 puertos seriales, CAN0
Tamaño	2.95" x 2.1"	3.37" x 2.125"	3.4" x 2.1"

Sistema Operativo	n/a	Linux	Android, Linux, Windows, Cloud9, CE, etc
Entorno	Arduino IDE	Linux, IDLE, OpenEmbedded, QEMU, Scratchbox, Eclipse	Python, Scratch, Linux, Eclipse, Android ADK
Costo	29.95 USD	35 USD	45 USD

Fuente: (Casco, 2014)

2.7 Cámaras infrarrojas para la recolección de datos en agricultura

La técnica de captura de imágenes en los cultivos se está usando mucho, pues es un método rápido, no invasivo ni destructivo, muy efectivo en la detección de las condiciones fisiológicas de los cultivos. Los sistemas de cámaras infrarrojas se basan en el registro de las variaciones espectrales, tanto en la radiación visible como dentro del espectro electromagnético en el rango infrarrojo (Vaughan, 2014)(Figura 12).

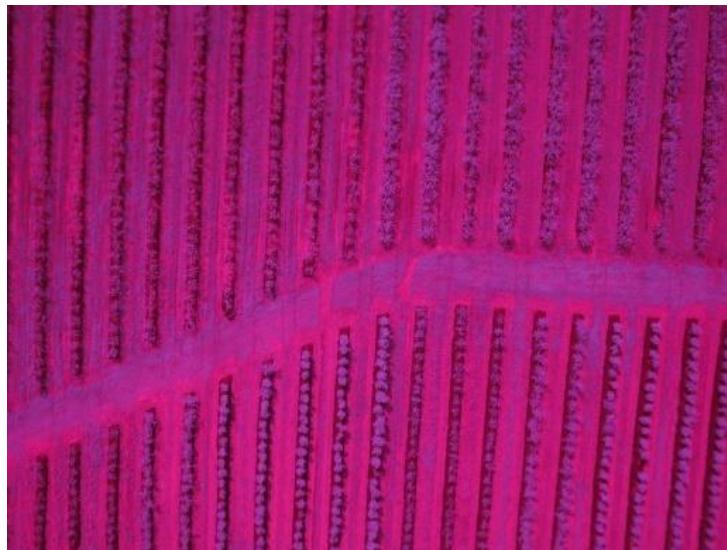


Figura 12. Imágenes infrarrojas sobre cultivos de arándanos

Fuente: (Agroindex, 2015)

2.8 Plataforma IoT Ubidots (broker)

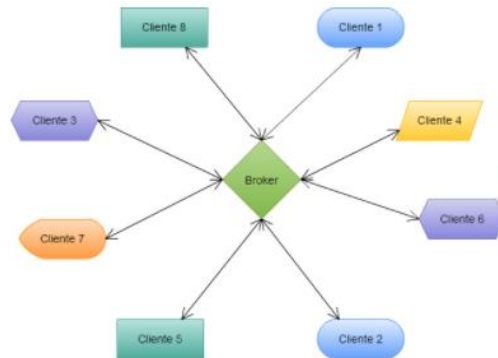


Figura 13. Broker

Fuente: (Gálvez, 2016)

Los bróker son gestionadores de red que transmite mensajes entre clientes (Figura 13) Ubidots es un bróker que suministra soluciones integrales de IoT con el apoyo de la empresa cofundadora Netux. Desde 2014 Ubidots se ha dado a conocer en los círculos de hardware, software, ingeniería integrada y fabricantes como una plataforma asequible, confiable y utilizable. La arquitectura de comunicación está basada en Pub/sub (publish/suscribe) la cual funciona basada en la creación o publicación de un canal, luego los interesados se subscriben a él y reciben la información que envía el editor que es quien creo el canal.

Ubidots permite monitorear, controlar y automatizar de forma remota los procesos para diversos clientes (del área médica, así como para startups y empresas estadounidenses o latinoamericanas) y se constituye en una valiosa herramienta para explorar y desarrollar tecnología y soluciones basadas en de aplicaciones de IoT. Los siguientes son algunos de los servicios que la empresa ofrece en su portafolio de soluciones:

- ✓ **Almacenar y visualizar información recibida desde sensores:** almacenar los datos o graficarlos para interpretarlos de una manera más sencilla. La aplicación también permite exportarlos, disponer de ellos de una manera directa y tratarlos con programas de análisis. No existe limitación en cuanto a los recursos de cada dispositivo, es decir, el número de parámetros que deben medir los sensores conectados (más allá de su propia capacidad) o el número de parámetros por enviar a los dispositivos desde la plataforma. Los valores de los parámetros recibidos en la plataforma se pueden almacenar hasta en un máximo de diez

campos (Data Buckets) diferentes. Cada Data Bucket puede almacenar datos de múltiples sensores, con una frecuencia máxima de un minuto (un almacenamiento cada minuto). Estos datos son accesibles y actualmente no hay limitaciones con respecto al tiempo o al tamaño de los datos. Los valores de los sensores se pueden visualizar hasta en un máximo de diez pantallas gráficas de visualización de datos (Dashboards).

- ✓ **Enviar información o instrucciones a dispositivos:** se pueden configurar los dispositivos a través de internet (por ejemplo, establecer una temperatura a la que se debe encender una caldera o directamente hacer que una puerta se abra o cierre cuando se desee).
- ✓ **Interactuar con aplicaciones como IFTTT (If This, Then That):** permite crear conexiones con diversos servicios en línea (servicios de almacenamiento de archivos en la nube como Google Drive, Dropbox y Skydrive), redes sociales como Facebook, Twitter, YouTube, Tumblr, Instagram y Foursquare; canales RSS de blogs y páginas web; sitios de marcadores sociales, de correos electrónicos, de mensajes de texto, de datos climatológicos y más.

3 Procedimiento

3.1 Diseño sistema mecánico para traslado automático de cámara

La parte hardware del proyecto consta de los sensores, la tarjeta raspberrypi3 con su cámara, y el SoC ESP32 que son elementos funcionales y comerciales ya existentes, pero también se requirió construir otro elemento físico que permitió poder trasladar la cámara de una cara de la pirámide a la otra.

3.1.1 Sistema mecánico para toma de imágenes

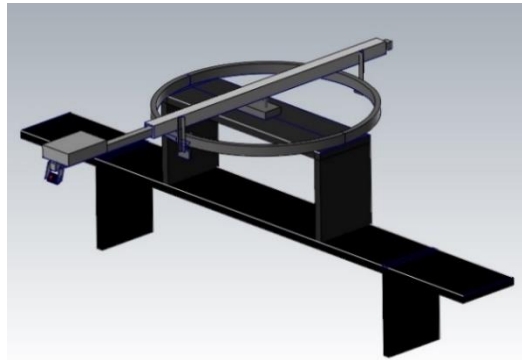


Figura 14. Sistema mecánico para la toma de imágenes

Fuente: CAD elaboración propia.

La toma de fotografías requirió de un sistema como el que se puede observar en la Figura 14, en este se tuvo en cuenta algunas características importantes para que lograra cumplir su objetivo, como, por ejemplo:

1. Soporte rígido estable y de fácil ubicación, con capacidad de sostener el peso y el mecanismo.
2. Brazo móvil para la sujeción de la cámara, con libertad de movimiento longitudinal de 180 grados.
3. Etapa de acondicionamiento de señal con sistema de control de velocidad y potencia para el accionamiento del *motor dc*.

3.1.1.1 Estructura de soporte mecánico

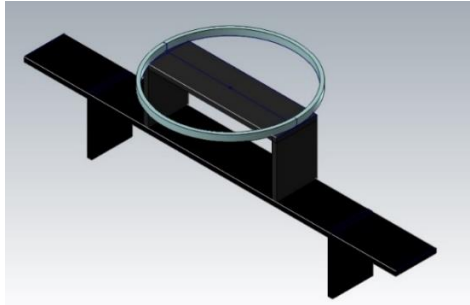


Figura 15. Soporte de sistema

Fuente: CAD elaboración propia.

- Longitud: 1200 mm
- Ancho: 130 mm
- Alto: 300 mm

El riel circular, ubicado en la parte superior sirve de soporte para el brazo móvil. Este además de ser guía para el desplazamiento del brazo, disminuye la fuerza de palanca hecha sobre la punta del brazo donde se ubica la cámara y la Raspberry pi3. Sus dimensiones son:

- Espesor: 20 mm
- Altura: 25 mm
- Radio: 250 mm

3.1.1.2 Brazo móvil

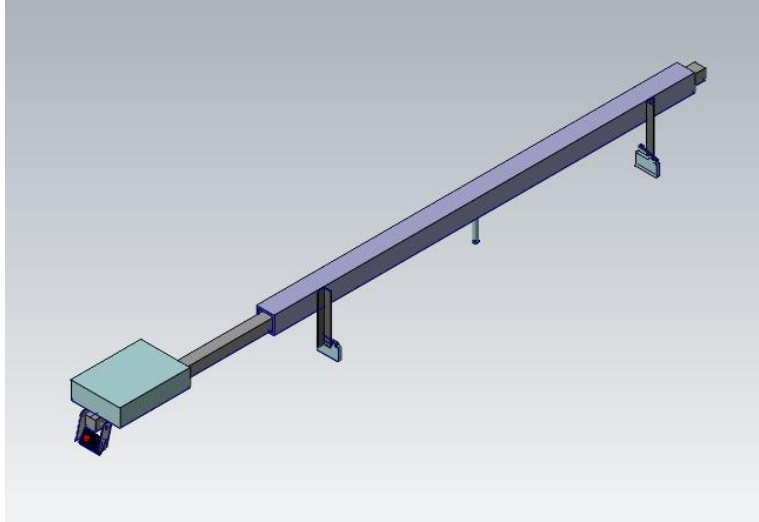


Figura 16. Brazo móvil

Fuente: CAD elaboración propia.

Longitud bastidor: 450mm

Longitud perfil interno: 1200mm

En una de las puntas del perfil de aluminio se ubicó el soporte móvil de la cámara para facilitar su ajuste de manera vertical.

3.1.1.3 Moto reductor

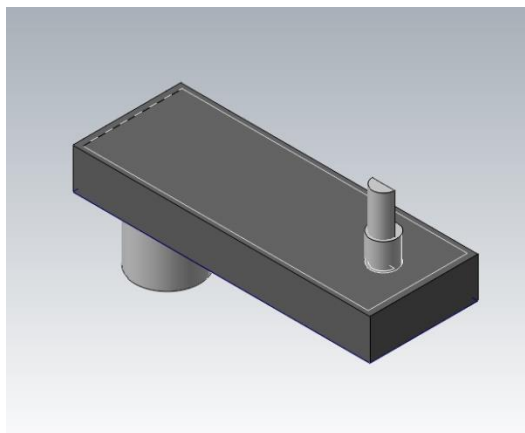


Figura 17. Motorreductor

Fuente: CAD elaboración propia.

Tal como se observa en la Figura 17, el motorreductor consta de un eje donde se conecta el brazo móvil, en este punto la fuerza suministrada por el motor de 12 voltios de corriente continua ya está potenciada por la combinación de engranajes. Esto se hace necesario por 2 factores, mejorar el torque que se debe ejercer para mover todo el brazo en conjunto, y reducir la velocidad de giro.

3.1.2. Control del sistema mecánico

El proceso inicia con una orden dada desde la plataforma Ubidots hacia la Raspberry, en ese momento se hace la primera captura por la cámara, seguido a esto el brazo empieza su desplazamiento en sentido horario hasta el punto donde de manera mecánica es activado uno de los pulsadores de final de carrera. En ese momento se detiene el brazo mecánico y después de una pausa de 3 segundos efectúa la segunda captura de imagen. Posteriormente el brazo mecánico retorna a su posición inicial definida por el accionamiento del segundo pulsador de final de carrera. (Figura 18)



Figura 18. Diagrama de flujo del accionamiento mecánico

Fuente: El autor

El programa en el que se soportó y se desarrolló la ejecución de la rutina de funcionamiento expresada en el diagrama de flujo de la Figura 18 fue: Python (Anexo C).

3.1.3 Sistema de captura de imágenes y coordinación de posición

El sistema se construye teniendo en cuenta los siguientes pasos: Espera de la orden inicial dada desde Ubidots para el inicio, Captura de la imagen de una de las caras, desplazamiento mecánico

a la segunda cara, captura de la imagen de la segunda cara, y finalmente retorno a la posición inicial.

El Sensor visual infrarrojo (cámara infrarroja) Raspberry pi3 Pi Rev 1 (Figura 19) permite capturar imágenes del estado actual del cultivo, los archivos de imagen son almacenados en la tarjeta Raspberry pi3 para su posterior procesamiento.



Figura 19. Módulo cámara infrarroja Raspberry pi3 pi rev 1.3.

Fuente: (Iberobotics, 2021)

Sus características técnicas son:

- Dimensiones son de: $20 \times 25 \times 10$ mm.
- Sensor omnivision 5647 de enfoque fijo de 5 megapíxeles
- Imagen con resolución 2592×1944 .
- Conexión por cable plano al conector S5
- Interfaz serie para cámara (CSI) MIPI de 15 contactos macho de la placa Raspberry pi3.

En el sistema mecánico anteriormente mencionado se necesitó la utilización de una tarjeta Raspberry pi3 para alcanzar dos objetivos: Regular la secuencia de movimiento del brazo robótico y capturar, procesar y almacenar las imágenes.

El conjunto de instrucciones para el accionamiento del sistema se hace por medio un sencillo programa instalado en la tarjeta Raspberry pi3 (ver Anexo C documento Programa Python). La Raspberry pi3, que se puede observar en la Figura 20, es un computador de placa reducida, única simple (SBC).

El criterio por el cual se utilizó esta tarjeta de desarrollo esta soportado en la tabla 2, donde se mencionan 3 tarjetas comerciales que actualmente son muy utilizadas para distintos proyectos, allí

se resaltan cualidades técnicas como el tipo de procesador, velocidad, Ram, sistema operativo, entorno, puertos de entrada salida y costo entre otras. Según criterios de diseño se resalta:

- Para este proyecto se requiere un computador de placa reducida que pueda almacenar fotografías de tipo infrarrojo y que además controle el mecanismo de desplazamiento.
- La tarjeta de desarrollo debe permitir conectar la cámara infrarroja mencionada anteriormente, debe recibir señales de los sensores de final de carrera para controlar posicionamiento es decir que debe tener puertos de entrada/salida, y contar con conexión wifi.
- Debe permitir utilizar varios lenguajes de programación para hacer una rápida migración a otros sistemas hacer mejoras en su funcionamiento.
- No se debe utilizar tarjetas que no tengan la posibilidad de conexión inalámbrica.

La tarjeta de desarrollo escogida es la Raspberry pi3, por contar con características funcionales adecuadas y poseer periféricos de fácil adquisición.



Figura 20. Tarjeta Raspberry pi3 b+

Fuente: (Xataca, 2018)

Sus características técnicas son:

- Procesador de cuatro núcleos de 64 bits que funciona a 1,4 GHz,
- Doble banda de 2,4 GHz
- LAN inalámbrica de 5 GHz

- Bluetooth 4.2 / BLE
- Ethernet más rápida y capacidad PoE a través de un PoE HAT separado
- Programación en distintos tipos de sistemas operativos, gracias a que posee un puerto SD, donde se pueden introducir tarjetas con los distintos sistemas operativos.

3.1.4 Acoplamiento tarjeta Raspberry a tarjeta de potencia y motor dc

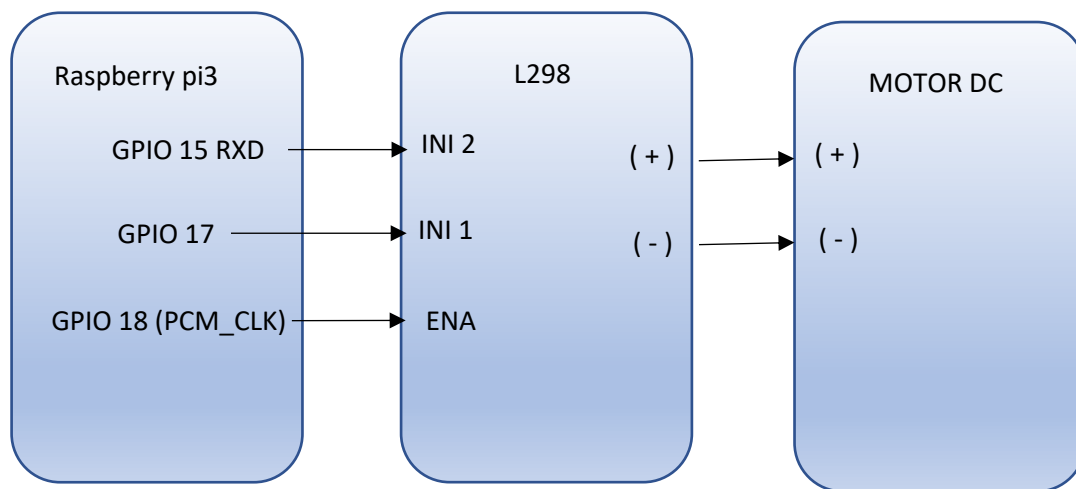


Figura 21. Conexiones Raspberry pi3 y tarjeta L298 y motor DC

Fuente: El Autor

Teniendo en cuenta que las instrucciones dadas por la tarjeta Raspberry pi3 a el sistema de movimiento no generaban la corriente suficiente para el accionamiento del motor dc utilizado, se hizo necesario utilizar una etapa de potencia para incrementar la corriente conocida comúnmente como un puente H. Revisando comercialmente se encontró la tarjeta L298 (driver del puente H) que es un dispositivo de uso general (Figura 21), al implementarlo en el sistema respondió a las instrucciones del programa satisfactoriamente y también nos dio la posibilidad de hacer uso del pin ENA, que es una entrada para una señal PWM, lo cual favoreció el poder reducir aún más la velocidad de giro.

Una vez capturadas las imágenes, estas reposan en la memoria de la Raspberry pi3, para poder observarlas se ingresa a ella con un programa de acceso remoto como por ejemplo el de Vnc

Viewer, pero para el caso puntual de este proyecto se optó por instalar la versión de AnyDesk disponible para este dispositivo, pues solo por medio de una clave de acceso permite ingresar directamente bien sea para observar las imágenes, o para transmitir las a cualquier otro computador para ser almacenadas adecuadamente. Las fotos obtenidas son como las observadas en la Figura 22, donde la Figura 22a corresponde a la captura de la cara 1 y la Figura 22 b a la imagen de la cara 2 y la Figura 22c a el mecanismo físico para la rotación de la cámara.



(a) imagen cara 1



(b) imagen cara 2



(c) imagen mecanismo rotación de cámara

Figura 22. Imágenes logradas con la cámara infrarroja sobre el prototipo.

Fuente: El autor

3.1.4 Sistema de sensores para fluido nutritivo y ambiente

Dentro del proyecto se hace necesario la ubicación apropiada de sensores que permitan detectar las condiciones de caudal, temperatura y continuidad del fluido nutritivo, así como también la temperatura humedad y presión del ambiente donde se encuentre ubicado el prototipo.

El sensor de caudal YF-S201 (Figura 23) está ubicado al final del recorrido del sistema recirculante ya que es un punto crítico para conocer la velocidad final del fluido nutritivo.

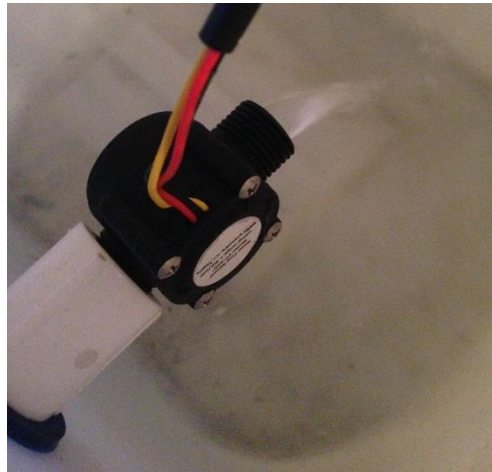


Figura 23. Sensor caudal instalado

Fuente: Toma directa sobre prototipo

Sus características técnicas son:

- Su sistema de funcionamiento es por Hall effect.
- El voltaje que se debe emplear para el funcionamiento adecuado es de 5 a 18 V DC.
- Con un consumo máximo de corriente: 15 mA
- La señal de salida es de 5V TTL.
- Tiene capacidad de censar paso de fluido entre 1 a 30 litros / minuto.
- Nivel de Precisión: $\pm 2\%$

Este dispositivo es capaz de medir caudales desde 1L/min hasta 30L/min, con presiones de 1.75 MPa, posee un sensor de efecto Hall que nos da una señal cuadrada en su salida cada vez que se produce algún movimiento en la turbina. Para calcular el caudal con este sensor sólo es necesario

contar la cantidad de pulsos que recibimos por segundo y luego dividir tal cantidad el factor de conversión especificado en el propio sensor.

El principio básico del funcionamiento de este dispositivo es el de una turbina impulsada por el paso del agua la cual está unida a un imán que activa un sensor de efecto Hall, este a su vez emite un pulso eléctrico que es leído por la entrada digital de la tarjeta SoC ESP32. Como el volumen de agua por cada pulso es fijo y de un valor conocido (promedio), se hace posible contar la cantidad de pulsos por unidad de tiempo (segundo o minuto), luego al multiplicar el valor de volumen por la cantidad de pulsos se logra determinar el caudal o flujo de agua. Calibrado puede llegar a tener un error hasta de hasta el 10%.

Este sensor se tuvo en cuenta para el ensamble de este proyecto porque está acorde a las necesidades del sistema de recirculación del fluido, está aislado del agua, de manera que siempre se mantiene seco y seguro, el criterio de la velocidad apropiada es de acuerdo con la observación de los resultados obtenidos en cuanto a la salud de la planta, es decir que compete directamente con la persona experta en temas de agricultura. También es importante tener en cuenta las características técnicas de la bomba impulsora (Figura 24) para estimar el caudal circulante



Figura 24. Placa de características técnicas bomba impulsora

Fuente: Toma directa a bomba de prototipo

El sensor de temperatura DS18B20 (Figura 25a) y el sensor de conductividad (Figura 25b), se ubicaron en el primer depósito, después de haber recorrido el sistema recirculante, pues en ese punto el líquido está más homogéneo en sus características de composición. (Figura 25)



(a) Sensor de temperatura DS18B20. (b) Sensor de conductividad SEN0244.

Figura 25. Sonda de temperatura y sensor de conductividad

Fuente: Toma directa sobre prototipo

Las características técnicas del sensor de temperatura DS18B20 son:

- Censa temperaturas de -55 a 125°C
- Permite resolución configurable: de 9 a 12 bits.
- Puede funcionar con un solo pin gracias a su interfaz 1-Wire ()
- Grado de precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$)
- Tiempo de muestreo inferior a 750ms
- Suministro de energía de: 3.0V a 5.5V.

La temperatura del fluido nutritivo es relevante de acuerdo con lo mencionado por (Alveal Concha & Campos Gonzales, 2014) “Es importante mantener las soluciones entre 13 y 15 ($^{\circ}\text{C}$) con el fin de prevenir una absorción reducida de nutrimentos” La sonda empleada cubija este rango de temperatura, siendo lo más relevante además de su fácil adquisición incluyendo el factor precio.

Lograr mantener el estado de hidratación de las plantas tiene que ver directamente con la concentración de sales disueltas en el fluido nutritivo, lo aconsejables es 1,5 a 2,3 ms/cm (Alveal Concha & Campos Gonzales, 2014) El sensor empleado para conductividad es el SEN0244, este acoge el rango apropiado para poder testear esta característica. Sus principales características técnicas son:

- Rango de medición de TDS: 0 ~ 1000ppm
- Voltaje de la señal de salida: 0 ~ 2.3V.
- Voltaje para su funcionamiento: 3.3 ~ 5.5V y corriente de 3 ~ 6mA
- Grado de precisión de TDS: $\pm 10\%$ FS (25 °C).

En el caso puntual de este proyecto se le realizó un proceso de calibración a estos sensores basandose en un patrón de medición comercial que se puede observar en el anexo D.

Para poder tomar los datos de nivel de CO₂ (Figura 26), luminosidad (Figura 28) y humedad temperatura ambiente (Figura 29), se diseñaron soportes de fácil colocación y remoción, pues estos se ubican de acuerdo con el criterio del investigador.

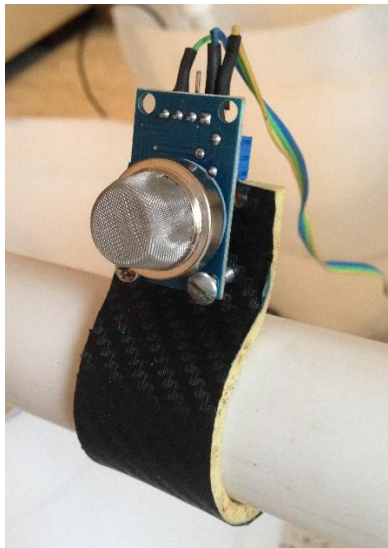


Figura 26. Sensor de CO₂ instalado

Fuente: Toma directa sobre prototipo

Una atmosfera con un bajo nivel de O₂ y alto de CO₂ puede ayudar a mantener la seguridad microbiológica del producto vegetal (Luna Riquelme, 2012) Bajo esta idea y otras varias que tiene que ver con la calidad y el punto de maduración de la planta, se hace necesario conocer la concentración en partes por millón de este elemento.

El sensor Mq 135 empelado en el desarrollo de este proyecto para las mediciones de CO₂, posee las siguientes características técnicas relevantes:

- Sensibilidad ajustable con el potenciómetro.
- Rango de detección: 10-1000ppm.
- Alta sensibilidad al Amoníaco (NH₃), Óxidos de nitrógeno (NO_x), Alcohol, Sulfuros, Benceno (C₆H₆), Monóxido de carbono (CO), humo y otros gases nocivos.
- Doble salida: Salida analógica y salida de nivel TTL.

Otra razón muy importante por la cual se tiene en cuenta este factor es porque la fotosíntesis neta aumenta a medida que los niveles de CO₂ aumentan de 340 a 1000 ppm (omafra, 2021). Esto hace que el sensor escogido sea el adecuado pues cubija los rangos mencionados, además de su fácil adquisición comercial y costo.

Para lograr calibrar el sensor de la manera adecuada se deben ajustar los parámetros como se muestra en las gráficas de la Figura 27, esto permitirá obtener el parámetro deseado, pero para el caso puntual de este proyecto se le realizó un proceso de calibración basado en un patrón de medición comercial que se puede observar en el anexo D.

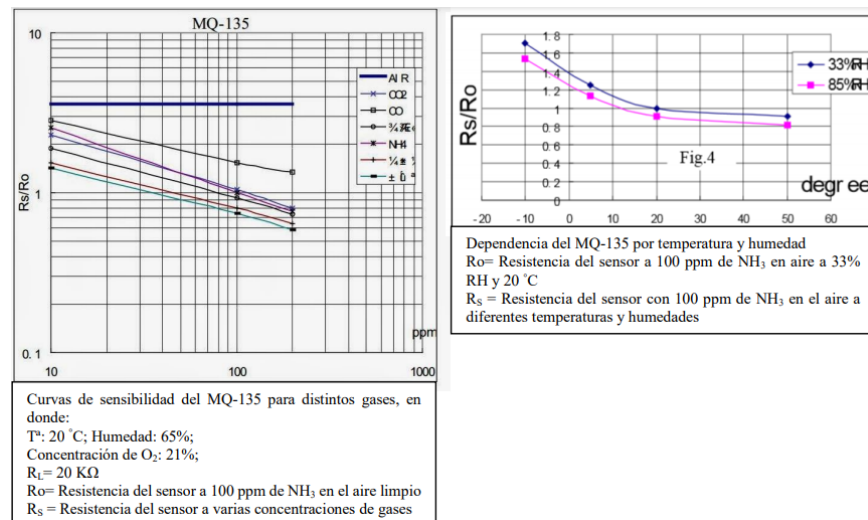


Figura 27. Gráficas de calibración para censo Mq135

Fuente: (NAYLAMP, 2021)

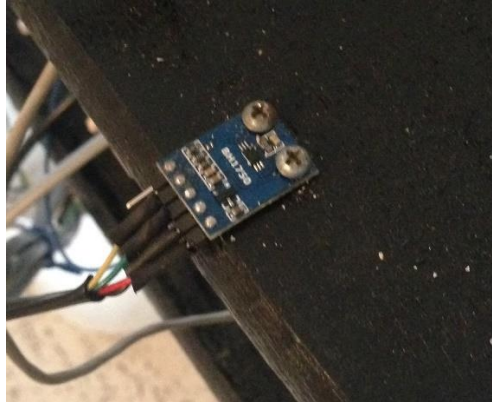


Figura 28. Sensor de luminosidad instalado

Fuente: Toma directa sobre prototipo

El sensor de iluminación utilizado tiene las siguientes características relevantes:

- Rango y Resolución: 1 - 65535 Lux (16 bits).
- Voltaje de operación: 2.4 VDC – 3.6 VDC.
- Interfaz Digital: I2C.
- Consumo promedio: 140uA - 199uA.
- Frecuencia máxima de transmisión: 400KHz.

La iluminación en los cultivos de forma natural o artificial cumple con los siguientes tres objetivos: Proveer cantidad suficiente de energía para la fotosíntesis, para el espectro energético adecuado y para la energía durante el fotoperiodo. (Pérez, 2016). Lo ideal de la luz que se utiliza es que contenga todas las frecuencias de espectro, por ese motivo el sensor para la luminosidad BH1750 en sus características técnicas, nos ofrece un nivel de sensibilidad muy apropiado para poder censar la iluminación del lugar donde se ubique la pirámide hidropónica de este proyecto, además su característica de conexión le permite acoplarse de manera directa al SoC ESP32. Para el caso puntual de este proyecto se realizó un proceso de calibración basado en un patrón de medición comercial que se puede observar en el anexo D.



Figura 29. Sensor de humedad instalado

Fuente: Toma directa sobre prototipo

Otro factor importante tiene que ver con la humedad y la temperatura ambiente, pues esta se debe mantener entre un valor de 60% y 80%. De acuerdo con la información de la tabla 3

Tabla 3. Requerimiento de iluminación para el cultivo de lechuga

Requerimiento	Rango
Temperatura	Germinación 19°C Desarrollo vegetativo 16°C en el día y 6° en la noche
Humedad relativa	Entre 60% y 80%
pH	Entre 6.4 y 7,4
Riego	De 200 a 400 ml por planta

Fuente: (HYDRO ENVIRONMENT, 2021)

Por este motivo el sensor cumple con las características apropiadas para poder hacer el testeo de esa variable de acuerdo con las siguientes especificaciones técnicas:

- Voltaje de Operación: 1.8V - 3.3V DC
- Interfaz de comunicación: I2C o SPI (3.3V)
- Rango de Humedad Relativa: 0-100% RH
- Precisión de HR: +-3%
- Ultra-bajo consumo de energía

- Completamente calibrado
- Frecuencia de Muestreo: 157 Hz (máx.)

3.2 Diseño de software

A continuación, se presenta una descripción del proceso de desarrollo de software, en la que primero, se definen los requerimientos funcionales de los sistemas implementados tanto para la adquisición y publicación de datos como para la toma de imágenes y control de la cámara infrarroja, y luego, se expone el software desarrollado en Micro Python en el SoC ESP32 y en Python 3 con la tarjeta Raspberry pi3.

3.2.1 Requerimientos funcionales y no funcionales.

De acuerdo con las necesidades del proyecto y teniendo en cuenta las opciones disponibles desde el Dashboard de Ubidots, se definieron unos requerimientos funcionales identificados con las siglas RF y otros requerimiento no funcionales con las siglas RNF respectivamente, los cuales permiten la puesta en marcha de los dos sistemas que componen este trabajo: El sistema de adquisición de datos basado en el SoC ESP32, y el control remoto automático de la cámara infrarroja implementado en la Raspberry pi3. En los requerimientos funcionales se describen los comportamientos del software en la ejecución de tareas, se refieren a qué debe hacer el software, mientras que los requerimientos no funcionales se enfocan en el cómo.

3.2.2 Sistema de adquisición de datos (SAD) con ESP32

RF (requerimiento funcional)-SAD -001:

Recopilar los datos de cada uno de los sensores, a través de los protocolos de adquisición de datos o el periférico asociado a cada sensor como se especifica a continuación:

Tabla 4. Sensores empleados y sus protocolos

Sensor / Variable	Periférico asociado / Protocolo
YSF-201 Caudalímetro	Digital input on/off
DS18B20 Temperatura	Onewire
SEN0244 Conductividad	ADC

BH1750 Iluminación	I2C
BME280 Temperatura, humedad, presión	I2C
MQ135 Dióxido de Carbono	ADC

Fuente: El autor.

RF-SAD –002:

Recibir la orden de activación y detención del censado desde la plataforma Ubidots.

RF-SAD –003:

Permitir la configuración del intervalo de muestreo entre 1 a 60 minutos desde la plataforma Ubidots.

RF-SAD-004:

Conectarse automáticamente a la red Wifi del access point disponible en el área de pruebas del prototipo.

RNF (requerimiento no funcional)-SAD-001:

El sistema debe conectarse a la plataforma Ubidots a través del protocolo MQTT por medio de tópicos definidos desde esa plataforma, tanto para publicación de los datos recopilados, como para la suscripción a las órdenes que se emitan desde allí.

3.2.3 Control remoto de la cámara infrarroja (CRCI)

CRCI-RF-001:

Recibir la orden de activación de la cámara desde la plataforma de Ubidots.

CRCI-RF-002:

Tomar una fotografía en cada costado del prototipo y almacenarla.

CRCI-RF-003:

Permitir el acceso remoto al sitio de almacenamiento de las fotografías para su verificación y descarga.

CRCI-RNF-001:

Conectarse vía MQTT a la plataforma Ubidots (broker) para la recepción de orden de activación de la cámara, así como para el reporte de actividad.

3.2.4 Funcionamiento del sistema de comunicación.

La comunicación se va a realizar entre el SoC ESP32 y la plataforma de IoT Ubidots por medio del protocolo MQTT, la dinámica de funcionamiento se puede interpretar en el siguiente diagrama. (Figura30)

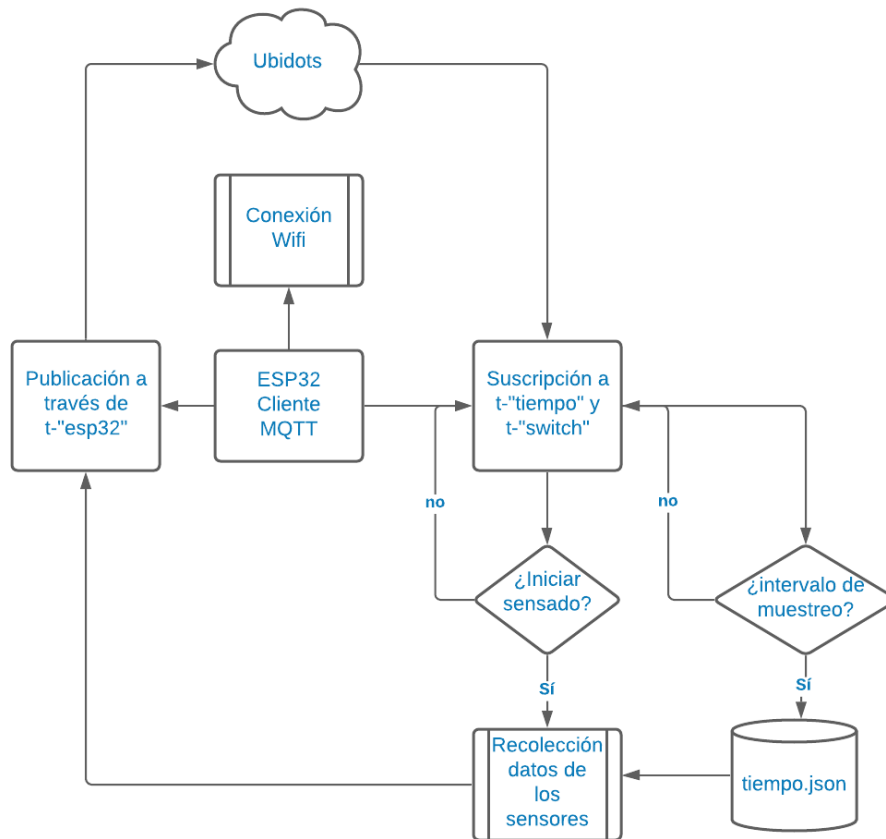


Figura 30. Algoritmo diseñado para el servicio prestado por el broker en el SAD

Fuente: El autor

En este algoritmo se puede observar como el cliente MQTT ESP32 una vez conectado a internet a través de su interfaz wifi, queda suscrito a unos tópicos que le permiten obtener la orden para detener el censado o iniciarlo y el intervalo de muestreo necesario para ello. Una vez recibe la

orden se procede con la recolección de datos. A través del tópico “switch” se recibe un 1.0 para iniciar y 0.0 para detener el censado, con el tópico “tiempo”, se recibe el valor en minutos del intervalo de muestreo.

El proceso de censado implica recolectar las lecturas de cada sensor de acuerdo con el protocolo de comunicación que utiliza para transmitir su información o bien la conversión análogo digital necesaria.

La programación se realizó a través de Micro Python, una versión de Python 3 adaptada para la programación de SoC como el ESP32, que conserva las características de enfoque funcional y orientado a objetos de Python3, esto sumado al hecho que al ser un lenguaje de alto nivel e interpretado, permite ver en tiempo real los resultados de la ejecución de comandos en su shell de programación. Lenguajes populares como c, c++ y derivaciones como la de Arduino, tienen un enfoque procedimental que no aporta la misma flexibilidad y escalabilidad de los programas construidos con un enfoque orientado a objetos.

3.2.4.1 Interacción Micro Python y ESP32

Micro Python es una implementación del lenguaje Python, optimizada para poder ejecutarse en un microcontrolador como es el caso del SoC ESP32, esta implementación provee una buena cantidad de librerías que permiten interactuar con los periféricos y las interfaces de comunicación con las que cuenta este dispositivo. En su documentación se encuentra, por ejemplo, la información relativa al trabajo con la interfaz de red “Networking” y por medio del módulo “network” se adquiere, los atributos, métodos y algunos ejemplos de cómo usarla para detectar las redes wifi-disponibles, conectarse y validar si el dispositivo está conectado, en el proyecto, esta tarea se ejecuta desde el archivo boot.py

3.2.4.2 Creación del cliente MQTT

En el proyecto realizado se importaron los módulos robust y simple de MQTT, a partir de los ejemplos publicados por Ubidots en su sitio web. Allí se encuentra la clase MQTT Client con la cual se crea la instancia para utilizar los métodos subscribe and publish: Proyecto para el Sistema de adquisición de datos SAD.

En el archivo main.py, se encuentra el programa principal donde se alojan las funciones esenciales, se realiza la suscripción a los tópicos MQTT y la publicación de los mensajes acorde con la documentación de la plataforma Ubidots.

```
client.subscribe(b"/v1.6/devices/esp/switch/lv", qos = 2)
client.subscribe(b'/v1.6/devices/esp/tiempo/lv')
```

Figura 31. Suscripción a tópicos “switch” y “tiempo

Fuente: Programa Python.

De acuerdo con la documentación de Ubidots, los tópicos están organizados de forma jerárquica, primero va la versión del sistema, seguido de la palabra devices; la variable desde la cual se reciben los mensajes en el dashboard de Ubidots, y las letras “lv.” (Figura 31) Esto también es aplicable para el proceso de publicación de datos, como se observa a continuación: (Figura 34)

```
client.publish(b"/v1.6/devices/ESP32", msg)
```

Figura 32. Publicación de mensaje a través del tópico ESP32

Fuente: Programa Python

Como se puede ver en la Figura 32, se está transmitiendo la variable msg, que viene siendo el Payload o carga útil, compuesta por los datos recopilados de los sensores. Este payload es un objeto JSON como el ejemplo que se ve en la Figura 33, de acuerdo con la documentación de Ubidots, este es el formato que aceptan para la recepción de mensajes en UTF-8. En Python se crea un diccionario que luego se transforma en un json en UTF-8 o tipo byte.

```
POST /api/v1.6/devices/{API_LABEL_FOR_DEVICE}/?token={TOKEN} HTTP/1.1
Host: industrial.api.ubidots.com
Content-Type: application/json
Content-Length: 51

{"temperature": 25, "humidity": 56, "pressure": 63}
```

Figura 33. Ejemplo de un mensaje JSON enviado al API de Ubidots.

Fuente: Programa Python

Una vez enviadas las variables y las lecturas correspondientes, la plataforma Ubidots se encarga de organizarlos en su plataforma como se muestra en la Figura 34, El programa completo desarrollado en Micropython se puede observar en el Anexo B.

La plataforma Ubidots se seleccionó para este proyecto por varios factores, como la seguridad, la facilidad de usar varios lenguajes de programación que se pueden adaptar para su uso, pero principalmente por la cantidad de desarrollos realizados en ella, haciendo que exista gran cantidad de librerías disponibles creadas por sus propios usuarios.

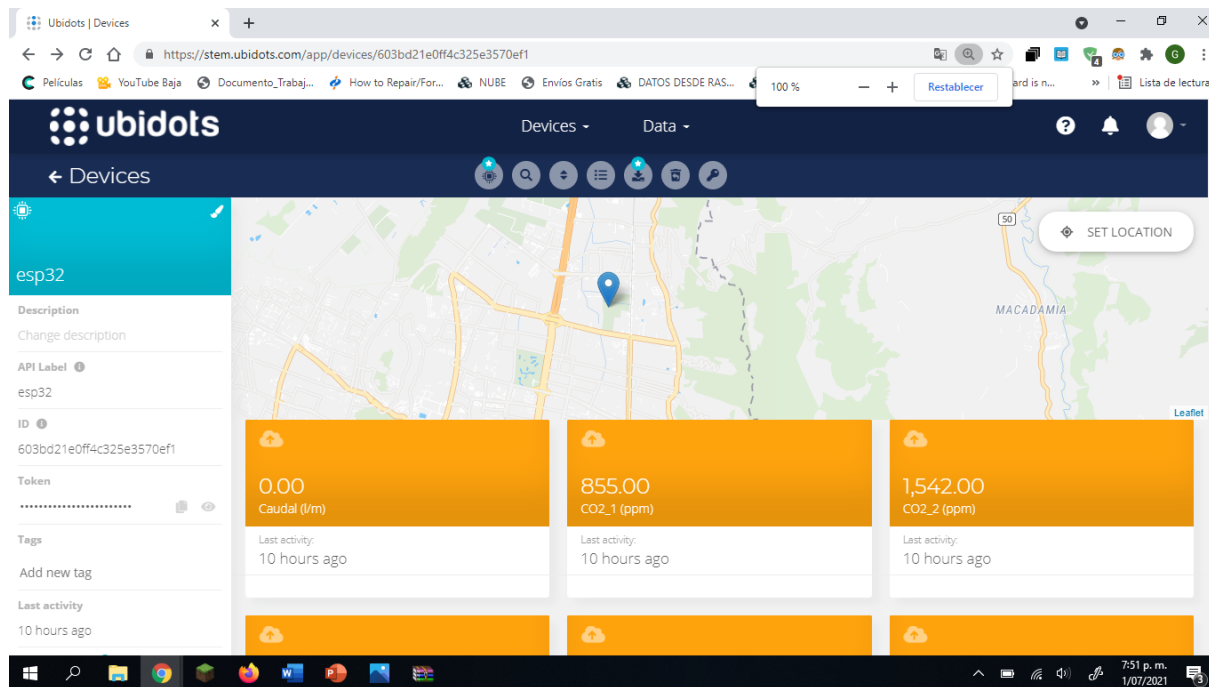


Figura 34. Variables y valores organizados en la plataforma Ubidots

Fuente: Plataforma Ubidots

Al acceder a cada variable de forma independiente, se puede ver una gráfica y los últimos datos recibidos por la plataforma (Figura 35).

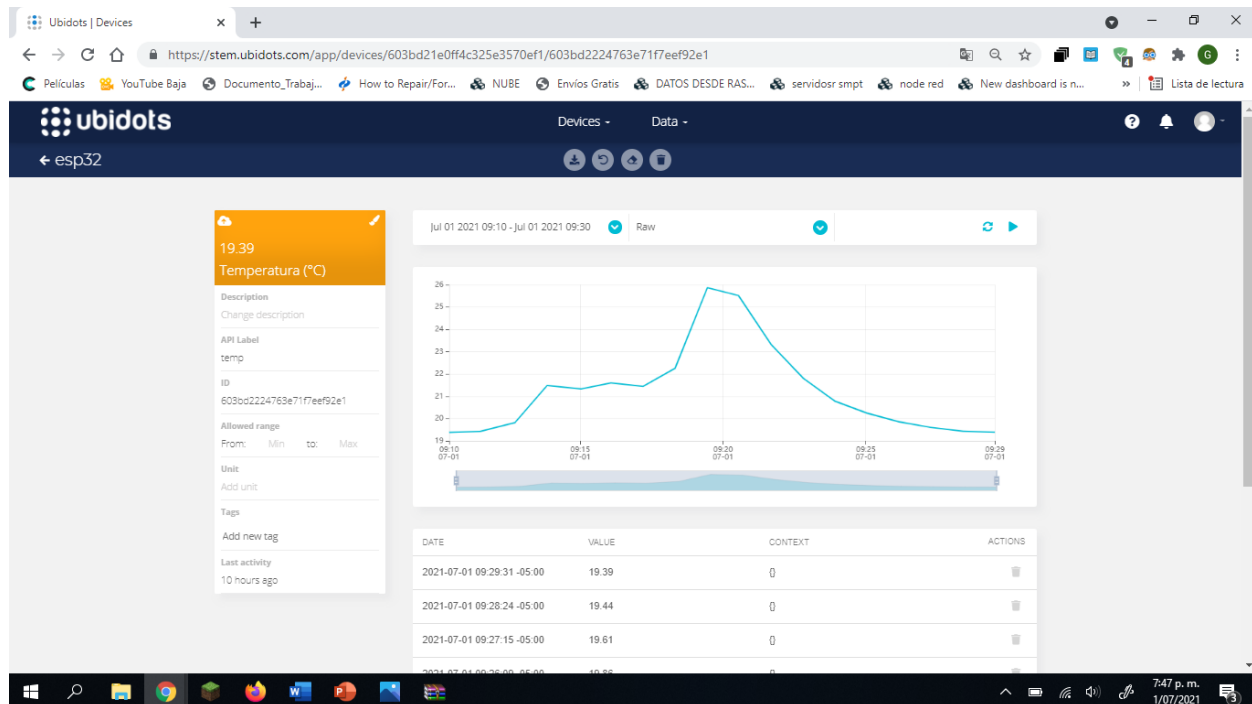


Figura 35. Gráfica y datos de la variable temperatura

Fuente: Plataforma Ubidots

La plataforma tiene la capacidad de generar el correspondiente *dataset* (Tabla 5), que también se puede visualizar en Excel, esta información es enviada directamente al correo electrónico del suscriptor.

Los pasos para obtener un *dataset* son:

1. Debe ingresar a el icono del sensor como se puede observar en la Figura 36.

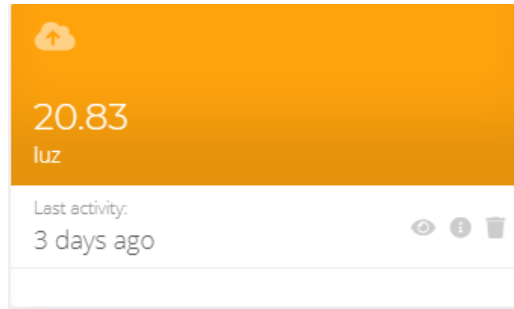


Figura 36. Icono de la variable

Fuente: Plataforma Ubidots.

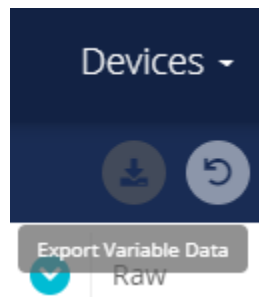
Al realizar esto, se desplegará una nueva pantalla donde se observan la gráfica del comportamiento en el tiempo de la variable, y una tabla de los datos (Figura 37):



Figura 37. Gráfica y tabla de datos online de uno de los sensores.

Fuente: Plataforma Ubidots

2. Ingresar al icono de *export variable data* (Figura 38a).



(a) Icono de descarga.

(b) Configuración para los datos de visualización.

Figura 38. Cuadro de configuración para descarga de *dataset*.

Fuente: Plataforma Ubidots

Se desplegará una nueva ventana, Figura38b, donde se puede configurar la fecha de inicio y final de los datos que van a ser enviados, al correo del subscriptor.

3. Dar click en Exportar.

Es así como al correo del subscriptor llega un archivo .csv, que al abrirlo en Excel se puede observar de la siguiente manera. (Tabla 5)

Tabla 5. *Dataset* obtenido

timestamp	luz	context_luz	date
1,61867E+12	58.33	{}	2021-04-17 09:41:30.172000-05:00
1,61867E+12	56.67	{}	2021-04-17 09:40:29.868000-05:00
1,61867E+12	53.33	{}	2021-04-17 09:39:29.444000-05:00
1,61867E+12	56.67	{}	2021-04-17 09:38:29.033000-05:00
1,61867E+12	64.17	{}	2021-04-17 09:37:28.610000-05:00
1,61867E+12	115.0	{}	2021-04-17 09:36:28.198000-05:00
1,61867E+12	71.67	{}	2021-04-17 09:35:27.682000-05:00

1,61867E+12	69.17	{}	2021-04-17 09:34:27.369000-05:00
1,61867E+12	218.33	{}	2021-04-17 09:33:26.854000-05:00
1,61867E+12	209.17	{}	2021-04-17 09:32:21.413000-05:00
1,61867E+12	220.0	{}	2021-04-17 09:31:20.998000-05:00
1,61867E+12	77.5	{}	2021-04-17 09:30:20.579000-05:00
1,61867E+12	65.83	{}	2021-04-17 09:29:20.164000-05:00
1,61867E+12	66.67	{}	2021-04-17 09:28:19.745000-05:00

Fuente: Plataforma Ubidots.

En la estructura del *dataset* obtenido se visualizan:

- Nombre de la variable.
- Valor censado de la variable.
- Contexto.
- Fecha y hora del evento.

El valor de la tercera columna llamada *context* (contexto) es una opción donde se pueden colocar datos paralelos a la toma desarrollándose, también se puede configurar como la entrada de otro tipo de información simultánea. Pero para el desarrollo de este proyecto se obtuvieron los datos más relevantes como el valor de la variable y momento del muestreo Tabla 6.

Tabla 6. Dataset: valor de la variable y tiempo del muestreo

	luz	date
0	20.83	2021-04-26 18:10:51.141000-05:00
1	21.67	2021-04-26 18:09:45.457000-05:00
2	21.67	2021-04-26 18:08:39.436000-05:00
3	21.67	2021-04-26 18:07:33.779000-05:00
4	21.67	2021-04-26 18:06:27.735000-05:00
5	21.67	2021-04-26 18:05:22.112000-05:00
6	22.5	2021-04-26 18:04:16.150000-05:00
7	22.5	2021-04-26 18:03:10.227000-05:00
8	22.5	2021-04-26 18:02:04.350000-05:00

9	23.33	2021-04-26 18:00:58.716000-05:00
10	23.33	2021-04-26 17:59:52.780000-05:00
11	23.33	2021-04-26 17:58:46.618000-05:00
12	24.17	2021-04-26 17:57:41.915000-05:00
13	24.17	2021-04-26 17:56:34.928000-05:00
14	25.0	2021-04-26 17:55:29.083000-05:00
15	25.83	2021-04-26 17:54:23.036000-05:00

Fuente: Plataforma Ubidots

4 Pruebas

El objetivo de este capítulo es realizar la validación del sistema por medio de generar sencillas instrucciones para verificar el funcionamiento del sistema.

4.1 Diseño experimental

La estrategia metodológica utilizada en este proyecto es la de validación de instrumentos, pues se verifica el funcionamiento del sistema para la toma de fotografías y la transmisión de información lograda por los sensores a la plataforma Ubidots creando los correspondientes *dataset*.

El protocolo experimental obedeció a la correcta elaboración de ensamble y los requerimientos del diseño hardware y software.

Para validar el correcto funcionamiento de este sistema fue necesario explorar las características funcionales de la plataforma IoT Ubidots, allí se pudieron segmentar la cantidad de datos a un lapso específico, esto permitió el análisis de variaciones como se puede observar en el anexo E donde hay unas mediciones comparativas.

4.1.1 Tipo de investigación

Al ejercer control sobre el sistema de toma de imágenes de forma remota, y al poder hacer cambios en el tiempo de muestreo para la toma de datos de los sensores por medio de la plataforma IoT Ubidots se logra la creación de distintos grupos de datos aleatorios que al analizarlos

adecuadamente nos ayudan a validar el funcionamiento de todo el sistema. Por eso se puede deducir que esta se trata de una investigación experimental.

4.1.2 Fuentes de información

Fuente primaria: Las fotografías obtenidas por el sistema y los *dataset* generados son información de tipo primario para el análisis del funcionamiento del proyecto.

Fuentes secundarias: Se realiza una revisión bibliográfica para encontrar características técnicas de cada sensor y de la cámara infrarroja ubicada en el prototipo del sistema hidropónico.

4.1.3 Técnicas de recolección de información

Para obtener información de estos datos primarios, se debe poner a funcionar el prototipo de cultivo hidropónico (Figura 39), esto ayudara a que factores como el caudal la temperatura y conductividad del fluido cambien. La parte correspondiente a humedad luminosidad y CO2 hacen parte de la caracterización de las condiciones ambiente.



Figura 39.. Prototipo de sistema hidropónico en funcionamiento

Fuente: El autor.

Los resultados se pueden descargar en los *dataset* correspondientes, se tienen en cuenta principalmente el valor de la variable censada y el tiempo de captura correspondiente. Figura (40).

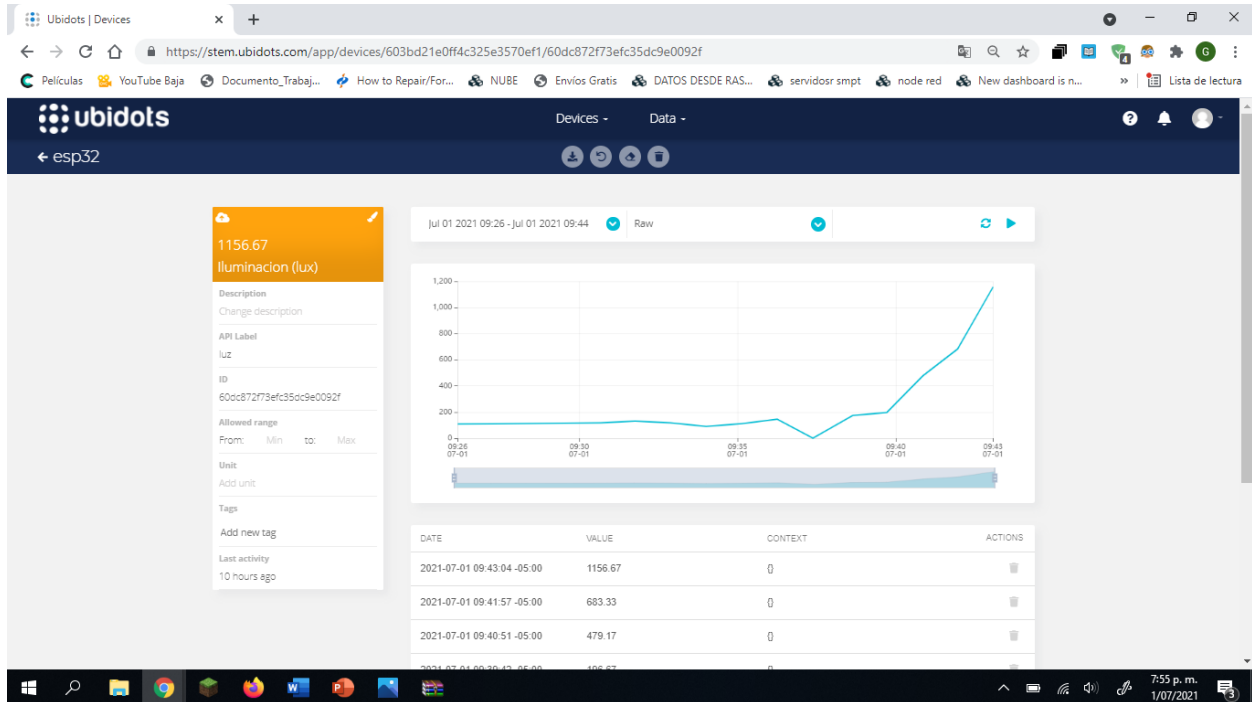


Figura 40. Dataset generados en la toma de datos

Fuente: El autor

Otros datos que se deben recopilar son los correspondientes a la captura de imágenes, para lograr esto se ejecuta la activación del botón cámara en el cuadro de mandos (Figura 41) de la plataforma Ubidots. El registro de imágenes nos permite observar que efectivamente se hizo la captura de las dos caras de la pirámide.

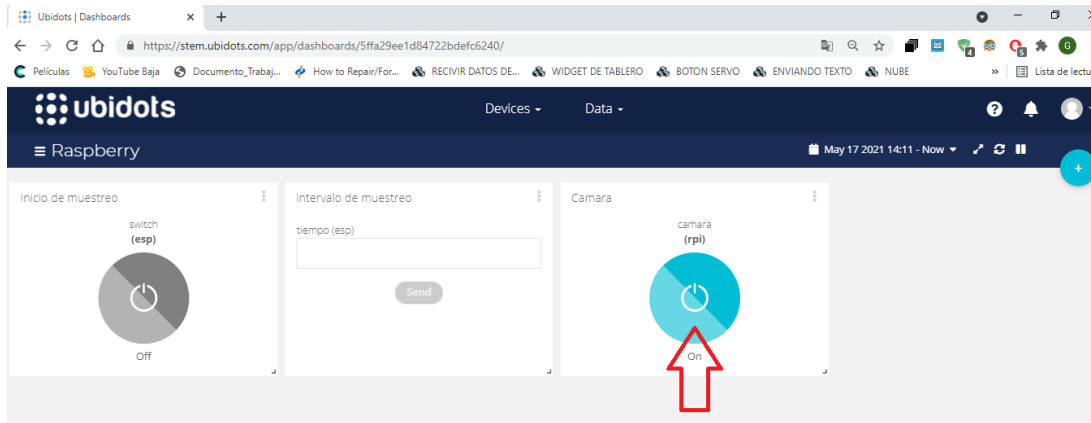


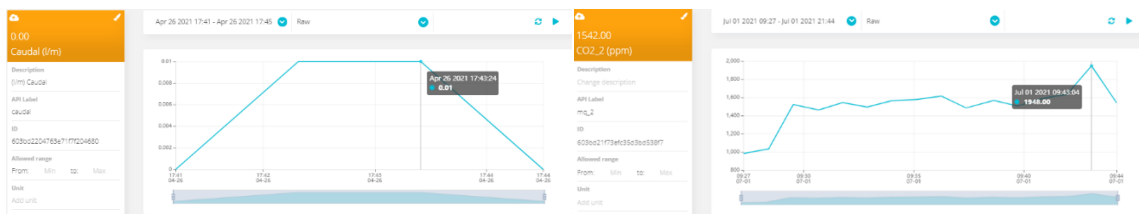
Figura 41. Botón de activación cámara

Fuente: El Autor

4.1.4 Análisis de datos

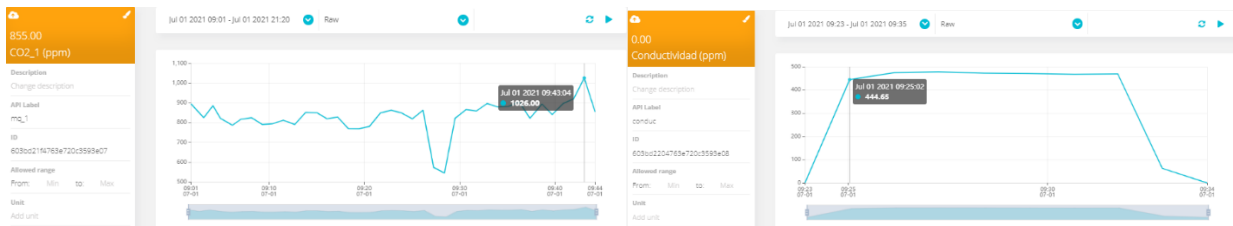
Los datos primarios obtenidos obedecen a una situación controlada por las condiciones básicas del fluido nutritivo y a condiciones ambientales relativamente estables por la ubicación del prototipo.

En la siguiente grafica obtenida en la plataforma de Ubidots se puede observar un estimado del comportamiento del caudal (42a), CO2 (42b y 42c), conductividad del fluido nutritivo (42d), humedad (42e), iluminación (42f), temperatura ambiente (42g) y temperatura del fluido (42h), en cada uno de los sensores. (Figura 42)



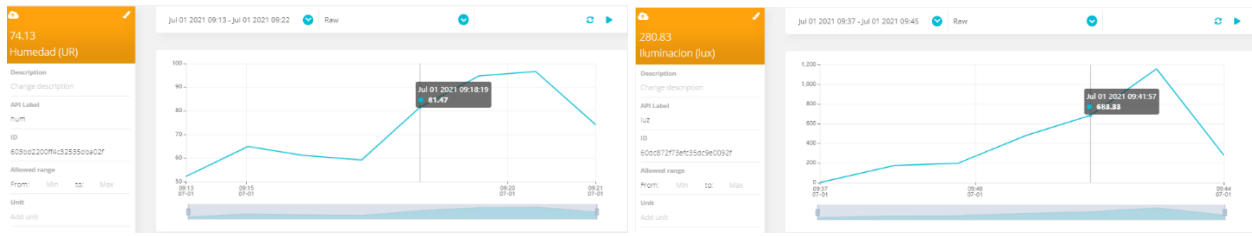
(a) Comportamiento de caudal

(b) Comportamiento nivel CO2-1



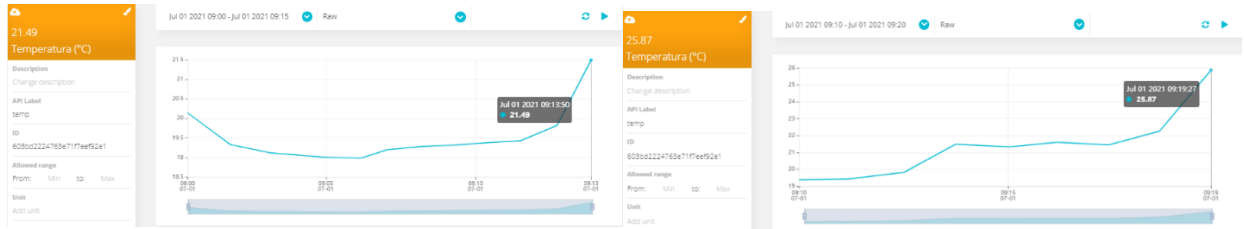
(c) Comportamiento nivel de CO2-2

(d) Comportamiento conductividad fluido



(e) Comportamiento de la humedad

(f) Comportamiento de iluminación



(g) Comportamiento temperatura ambiente

(h) Comportamiento temperatura fluido

Figura 42. Imágenes de respuesta de los sensores durante el tiempo

Fuente: Plataforma de Ubidots

Las variaciones observadas en la figura 42 corresponden a la respuesta de los sensores sometidos a cambios fuertes de manera intencional y artificial, esto con el fin de verificar su correcto funcionamiento y comportamiento en el rango requerido.

Como ya se mencionó anteriormente, los datos de estas graficas son fácilmente enviadas al correo del suscriptor, una vez en el computador personal del interesado, lo pasamos a el programa Excel, el cual tiene herramientas que ayudan a un mejor análisis del *dataset* obtenido (Tabla 6).

Se realizaron capturas de imágenes en tiempo aleatorio sin obtener problemas en cuanto a el funcionamiento del mecanismo y sistema en general (Figura 43):



Figura 43. Imágenes capturadas en las caras del prototipo.

Fuente: El autor.

Al momento de descargar el archivo de las imágenes, estas se pueden caracterizar con un nombre apropiado según criterio del investigador.

4.1.5 Seguimiento a las condiciones del cultivo hidropónico de lechuga.

Por las especificaciones técnicas de cada sensor, el desarrollo de este proyecto permite hacer seguimiento a las condiciones del cultivo de lechuga que se pretende instalar en el invernadero de la escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.

Los tiempos de muestreo para los sensores, se pueden calibrar entre 1 y 60 minutos máximo, y esto es de acuerdo con la necesidad del investigador. El sistema opera de manera continua y es capaz de almacenar datos hasta de 2 años.

Para poder obtener los datos de un lapso se debe ingresar a la plataforma de Ubidots, escoger la variable a estudiar, y seleccionar el valor inicial y final del tiempo de muestreo, esta tarea se facilita al hacer una revisión de la gráfica de comportamiento quien además facilita label de detección punto a punto.

5 Conclusiones

Las plataformas de IoT permiten generar ecosistemas de dispositivos interconectados, son versátiles y propician una interacción sencilla entre usuario y sistema, con el fin de lograr organizar e interpretar datos de una manera más adecuada. Se puede acceder rápidamente a ellas por medio de la red de internet desde cualquier parte del mundo gracias a los dispositivos de comunicación móviles.

Al validar los instrumentos de censado con respecto a las tarjetas de procesamiento y transmisión, se puede reconocer que los factores de interoperabilidad cada vez se superan de una mejor manera, pues en la fabricación de cada elemento se, van unificando los criterios de interconexión para lograr comunicaciones más eficientes. La interoperabilidad también es un factor importante en la administración de la información pues nos permiten adquirir elementos o servicios que requieran los cultivos.

Lograr el monitoreo remoto y la captura de imágenes permite que se puedan hacer mejores avances en las investigaciones, pues dar la orden de inicio para el muestreo o toma de imágenes depende directamente del investigador, quien opera según su criterio científico, Además el acceso virtual al sistema del cultivo es más sencillo que el desplazamiento físico para la toma de información.

Diseñar e implementar este tipo de proyectos contribuye a descubrir que se puede acceder a tecnologías recientes y eficaces de una manera sencilla y económica teniendo en cuenta el factor de costo beneficio. Esto es muy valioso ya que más usuarios se pueden ver beneficiados y les permite optimizar su productividad mejorando también así sus ingresos y calidad de vida.

La tecnología necesita incursionar en el campo del agro cada vez de manera más fuerte y contundente para poder ayudar a equilibrar la actual demanda mundial de alimentos.

Referencias

- Agroindex. (25 de diciembre de 2015). *Agroindex*. Obtenido de <http://agroindex.blogspot.com/2015/12/blog-post.html>
- Álvarez, G. D. (12 de mayo de 2017). Uso inadecuado del suelo en Colombia: un generador de Gases Efecto Invernadero. Bogotá, DC, Colombia.
- Alveal Concha, M. A., & Campos Gonzales, K. (2014). *Estudio comparativo de sistemas de riego*. Chile: Unversidad del Bio Bio.
- Arcos B., Benavides, O., & Rodriguez, M. (2011). Evaluación de dos sustratos y dos dosis de fertilización en condiciones hidropónicas bajo invernadero en lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista de Cencias Agricolas* 28, 95-108.
- Beltrano, J., & Gimenez, D. (2015). *Cultivo en hidroponia*. Buenos Aires Argentina: Universidad de la Plata.
- Best, S., Mendez, L., Flores, F., & Aguilera, H. (2014). *ADOPCIÓN Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA*. Chillan, Chile: Progap-INIA.
- Botanium. (17 de marzo de 2021). *botanium.se*. Obtenido de <https://botanium.se/>
- Botanium. (17 de marzo de 2021). Maceta de riego automatico. Estocolmo, Suecia.
- Cardador. (12 de junio de 2017). *Tecnicas hidroponicas*. Obtenido de Hidroponia al cubo: <https://hidroponiaalcubo.wordpress.com/tecnicas/>
- Casco, S. M. (2014). Raspberry Pi, Arduino y Beaglebone Black. *Mini PCs*, 6.
- Ciampitti, I. A., & O, F. (2008). Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. II. Hortalizas, frutales y forrajeras. *IPNI Canada*, 1-4.
- Damien, G. (1 de abril de 2021). *Micropython*. Obtenido de <https://micropython.org/>
- Dignani. (s.f.).
- Dignani, J. (2011). *Analisis del Protocolo Zigbee. Trabajo final integrador de especializacion en Redes y Seguridad*. La Plata.: Universidad Nacional de la Plata.
- DNP. (2016). *Pérdida de alimentos en Colombia*. Bogota: Grupo de Comunicaciones y Relaciones.

- Esspresift. (12 de marzo de 2021). *Sistemas Shanghai*. Obtenido de <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- FAO. (2002). *Organizacion de las naciones unidas para la agricultura y la alimentacion*, 75.
- FarmBoot. (03 de mayo de 2021). *farm.boot*. Obtenido de <https://farm.bot/>
- Fernandez, A. (2005). *Sensores Magneticos e Inductivos*. Pachuca, Mexico: Universidad autonoma del estado de Hidalgo.
- Gálvez, J. A. (3 de mayo de 2016). *GEEKY THEORY*. Obtenido de <https://geekytheory.com/ques-mqtt>
- HEE P, M., & L., B. (2001). Effects of CO concentration, light intensity and nutriment level on growth of leaf lettuce in the a plant factory. *Acta Horticulturae* 548, 377-383.
- HYDRO ENVIRONMENT. (3 de mayo de 2021). *hidroenv*. Obtenido de https://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=24
- Iberobotics. (3 de mayo de 2021). *IBEROBOTICS*. Obtenido de <https://www.iberobotics.com/producto/camara-infrarroja-para-raspberry-pi/>
- IGAC. (12 de mayo de 2017). Uso inadecuado del suelo en Colombia: un generador de Gases Efecto Invernadero. Bogota, DC, Colombia.
- Ironox. (1 de enero de 2021). *ironox.com*. Obtenido de <https://ironox.com/team/>
- Juan José Díaz García. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes*. Madrid: UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID .
- Luna Riquelme, M. C. (2012). *Influencia de los factores Pre y Postcosecha en la calidad de la lechuga IV Gama*. Madrid: Universidad de Murcia.
- Maroto, J. (2000). Botánica (taxonomía y fisiología) y adaptividad. En M. Joseph, M. A. Gomez, & S. Baixauli, *La lechuga y la escarola* (págs. 28-41). Madrid: Valencia Fundación Caja Rural Valencia Madrid etc. Mundi-Prensa.
- Modernell, P. (1 de abril de 2021). *Plataforma de Pruebas de Conformidad LoRa Wan*. Obtenido de Universidad de la Republica, Montevideo: <https://n9.cl/gap3v>
- NAYLAMP. (3 de mayo de 2021). *naylampmechatronics*. Obtenido de https://naylampmechatronics.com/blog/42_tutorial-sensores-de-gas-mq2-mq3-mq7-y-mq135.html
- Pérez, L. E. (2016). *Efecto de la intensidad lumínica de lámparas LED en la producción*. Guayaquil, Ecuador: UNIVERSIDAD CATÓLICA.

- R., A., Gimenez, D., & Beltrano, J. (2015). Soluciones nutritivas II. *Produccion hidropónica de chile habanero negro* , 91-108.
- Rojas, C. O. (13 de febrero de 2017). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA. Ibagué, Tolima, Colombia.
- Rosero, P. (2017). INTERNET DE LAS COSAS Y REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: REVIEW. *Research Gate*, 3.
- Saavedra, G. (2017). *Manual de produccion de lechuga*. Chile: Boletín INIA N09.
- Universidad de Lleida. (7 de abril de 2020). *Agricultura de Precisión*. Obtenido de <http://www.grap.udl.cat/es/presentacion/ap.html>
- Vaughan, J. &. (20 de marzo de 2014). *Aplicaciones de la termografía de infrarrojos en la agricultura*. Obtenido de <https://www.innovagri.es/gestion-del-agua/termografia-infrarrojos-agricultura.html>
- Wei, J. (27 de Agosto de 2013). Record-Breaking \$17.3 Billion in Crop Losses Last Year; Significant Portion Potentially Avoidable. Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- Xataca. (25 de abril de 2018). *XATACA*. Obtenido de <https://n9.cl/9vrt>

Anexos

A Presupuesto

Debido a situaciones de último momento, el proyecto requirió la construcción de un prototipo para poder instalar todo el sistema y validar su funcionamiento. El software usado es de acceso libre en versión de pruebas, por lo cual no se tendrá en cuenta un valor económico para su utilización, A continuación, se describen los elementos que se necesitaron para el proyecto.

Tabla 7. Presupuesto

Descripción del recurso	Valores		Total	
	Unidad	Valor unitario	Cantidad	Valor
Recursos humanos				
Maquinaria y equipos				
Construcción prototipo Sistema hidropónico tipo pirámide	Unidad	\$375.000	1	\$375.000
Sensores				
Caudalímetro	Unidad	\$12.605	1	\$12.605
Conductividad	Unidad	\$70.000	1	\$70.000
Temperatura y humedad	Unidad	\$12.605	1	\$12.605
CO ₂	Unidad	\$ 20.000	1	\$ 20.000
Cámara infrarroja Raspberry pi3 REV 1.3	Unidad	\$ 65.000	1	\$ 65.000
Sistemas mecánicos				
Motorreductor eléctrico	Unidad	\$50.000	2	\$ 50.000
Sistema mecánico para toma de imágenes	Unidad	\$100.000	1	\$100.000
Sistemas embebidos				
Tarjeta Raspberry pi3	Unidad	\$300.000	1	\$300.000

Tarjeta de desarrollo ESP32	Unidad	\$ 27.000	1	\$ 27.000
<i>Software</i>				
Software Micro Python,	Hora	Libre	1	\$ 0
			Total	\$1.300.205

B Programa de captura de datos de sensor con ESP32

```
from umqtt.robust import MQTTClient

import time

import machine as m

from machine import Pin

from machine import ADC

import machine, onewire, ds18x20, time

from BME.bme280 import *

from BHT.bh1750 import *

from machine import Pin, I2C

import _thread

import ujson

# credenciales de la cuenta en Ubidots

ubidotsToken = 'BBFF-7EWfYC7TKILjSFJtZiKGgvLLS750GW'

clientID = 'dfvzbdfbdfb'

# creación del cliente MQTT

client = MQTTClient(clientID, "industrial.api.ubidots.com", 1883, user = ubidotsToken,

password = ubidotsToken)

# creación de sensor via I2C

i2c = machine.SoftI2C(scl=Pin(22), sda=Pin(21), freq=10000)

# Sensores BME280 y BH1750 conectados a los pines 21 y 22 del ESP32 comparten los mismos

pines pero tienen dirección diferente

bme = BME280(i2c=i2c)
```

```

s = BH1750(i2c)

client.connect()

def checkwifi(): # función para verificar la conexión wifi del ESP32

    while not sta_if.isconnected():

        time.sleep_ms(500)

        print(".")

        sta_if.connect()

checkwifi()

def sensorADC(npin): # función para la toma de datos a través de conversión ADC con precisión
de 12 bits

    adc = ADC(Pin(npin))

    adc atten(ADC.ATTN_11DB) # precisión de 0 a 3.3 Voltios

    lect = adc.read()

    #print(lect)

    voltaje = lect*(3.3/4095)

    #print(voltaje)

    return round(1000*((3.3-voltaje)/voltaje)) # normalizacion de la lectura

def flow_meter(pin): # Programa para el calculo de caudal volumetrico con detección de flancos
en sensor efecto hall

    DEBUG = False

    p = Pin(pin, Pin.IN)

    total_liters = 0

    secondes = 0

```

```

# Sampling

sample_rate = 10 # Muestreo cada 10 segundos

time_start = 0

time_end = 0

period = 0

hz = [] # Frecuencia

m = 0.0021 # segun el data sheet

# data

db_good_sample = 0

db_hz = 0

db_liter_by_min = 0

time_start = time.ticks_ms()

init_time_start = time_start # olvida el ultimo flanco detectado

time_end = time_start + sample_rate

hz = []

sample_total_time = 0

# flanco

current = p.value()

edge = current # Flanco de subida / Flanco de bajada

while time.ticks_ms() <= time_end:

    t = time.ticks_ms()

    v = p.value()

    #print(t, time_end)

```

```

if current != v and current == edge:

    time.sleep_us(10)

    period = t -time_start # tiempo de detección

    #print(period)

    if period > 0:

        new_hz = 1/period

        hz.append(new_hz)          # periodo = 1/periodo

        sample_total_time += t - time_start

        time_start = t

    current = v

segundos += sample_rate

nb_samples = len(hz)

if nb_samples >0:

    average = sum(hz) / float(len(hz))

    good_sample = sample_total_time/sample_rate

    db_good_sample = round(good_sample*100,4)

    average = average * good_sample

else:

    average = 0

average_liters = average*m*sample_rate;

total_liters += average_liters

db_hz = round(average,4);

db_liter_by_min= round(average_liters*(60/sample_rate),4)

```

```

return db_liter_by_min

def sensorTDS(pin): #https://wiki.seeedstudio.com/Grove-TDS-Sensor/ Función para la toma de
datos del sensor de conductividad

adc = ADC(Pin(pin))

adc atten(ADC.ATTN_11DB)

r = adc.read()

Voltage = r*3.3/4095

#print(Voltage)

if Voltage > 0:

    # Noralización de la lectura de acuerdo al data sheet.

    tdsValue=((133.42/Voltage*Voltage*Voltage) - (255.86*Voltage*Voltage) +
(857.39*Voltage))*0.5

else:

    tdsValue = 0.0

return tdsValue

def ds1820(pin): # función para la toma de datos de la sonda de temperatura

ds_pin = machine.Pin(pin)

ds_sensor = ds18x20.DS18X20(onewire.OneWire(ds_pin)) # protocolo One Wire

roms = ds_sensor.scan()

ds_sensor.convert_temp()

return round(ds_sensor.read_temp(roms[0]), 2) # normalización de la lectura y redondeo a 2
cifras decimales

#client.connect()

```



```

def sub_cb(topic, msg): # Función de callback para la interpretación del mensaje JSON enviado
desde Ubidots via MQTT

    m = msg.decode()

    t = topic.decode()

    print(t,m)

    # Comportamiento del sistema si se envia la orden de activar censado.

    if t == '/v1.6/devices/esp/tiempo/lv' and m != '0.0':

        time = float(m)

        time = time * 60

        h = open('tiempo.json')

        cont = ujson.load(h)

        print(cont['intervalo'])

        cont['intervalo'] = time

        with open("tiempo.json", "w") as outfile:

            ujson.dump(cont, outfile)

    elif t == '/v1.6/devices/esp/switch/lv' and m == '1.0':

        h = open('tiempo.json')

        cont = ujson.load(h)

        tiempo = int(cont['intervalo'])

        publish(tiempo)

def publish(tiempo): # función para la publicación de valores via MQTT al Broker de Ubidots

    var = sensorADC(36) #para MQ_1

    var2 = sensorADC(39) #para MQ_2

```

```

var3 = sensorTDS(34)

var4 = ds1820(4)

v = bme.values

lux = s.luminance(BH1750.ONCE_HIRES_1)

var5 = round(lux,2)

var6 = flow_meter(14)

# Mensaje estructurado en JSON para envío a broker de Ubidots con el tópico
/v1.6/devices/ESP32

msg =
b'{"MQ_1":%s,"MQ_2":%s,"conduc":%s,"sonda":%s,"temp":%s,"presion":%s,"hum":%s,"Luz":
%s,"caudal":%s}' % (var, var2, var3,var4,v[0],v[1],v[2],var5,var6)

print(msg) # el mensaje de tipo byte en UTF-8

client.publish(b"/v1.6/devices/ESP32", msg)

time.sleep(tiempo) # espera el intervalo de muestreo definido por mensaje que llega en tópico
/tiempo/lv

def mqtt_suscripcion(): # funcion para la suscripción permanente a los tópicos switch y tiempo.
while True:
    client.set_callback(sub_cb)

    client.subscribe(b"/v1.6/devices/esp/switch/lv", qos = 2)

    client.subscribe(b'/v1.6/devices/esp/tiempo/lv')

    time.sleep(5

```

```
_thread.start_new_thread(mqtt_suscripcion,()) # Hilo para que la suscripcion sea independiente  
al proceso de muestreo
```

C Programa de coordinación de movimiento y captura de imágenes

```
import paho.mqtt.client as mqtt

from picamera import PiCamera

from time import sleep

from gpiozero import Motor

import threading

global indicador

import paho.mqtt.publish as publish

from gpiozero import PWMLED

BROKER_ENDPOINT = "industrial.api.ubidots.com"

PORT = 1883

MQTT_USERNAME = "BBFF-7EWfYC7TKlJsfJtZiKGgvLLS750GW" # Put here your
TOKEN

MQTT_PASSWORD = ""

TOPIC = "/v1.6/devices"

DEVICE_LABEL = "rpi"

VARIABLE_LABEL = "camara"

camera = PiCamera()

camera.rotation = 180

camera.resolution = (2592,1944)

# resolucion minima es 64X64

camera.framerate = 15

camera.annotate_text_size = 100
```

```

motor = Motor(forward=17, backward=15) # descripcion para cambio de giro
button = Button(2) # Final de carrera 1
button2 = Button(3) # Final de carrera 2

global indicador
indicador = False

global contador
contador = 0 # configuracion de contador para rotulacion de imagenes

drive = PWMLLED(18)

def on_connect(mqttc, obj, flags, rc):
    print("[INFO] Connected!")

    topic = "{}/{}/{/lv".format(TOPIC, DEVICE_LABEL, VARIABLE_LABEL)
    print(topic)

    mqttc.subscribe(topic, 0)

def on_message(mqttc, obj, msg):
    global contador

    #print("[INFO] value received: {}".format(float(msg.payload)))

    valor = (msg.payload).decode()

    print(valor)

    if valor == "1.0":

        camera.annotate_text = "Foto #{}".format(contador)

        camera.capture('/home/pi/Desktop/IRcamera/images{}.jpg'.format(contador))

        camera.stop_preview()

```

```

contador += 1

print("Foto 1 tomada")

sleep(0.1)

drive.value = 0.4

motor.forward()

sleep(0.1)

drive.value = 0.2

#if button2.is_pressed:

#  motor.stop()

else:

motor.stop()

#if indicador == True:

#motor.stop()

    # camera.annotate_text = "Foto #1"

    # camera.capture('/home/pi/Desktop/IRcamera/images1.jpg')

    # camera.stop_preview()

    # print("Foto 1 tomada")

    # sleep(2)

    # motor.forward()

#else:

    # motor.stop()

    # print("esperando switch")

def on_publish(mqttc, obj, mid):

```

```

print("[INFO] Published!")

def on_subscribe(mqttc, obj, mid, granted_qos):
    print("[INFO] Subscribed!")

def on_log(mqttc, obj, level, string):
    print("[INFO] Log info: {}".format(string))

def retorno():
    global indicador
    while True:
        if button2.is_pressed:
            sleep(0.1)
            print("final de carrera 2")
            motor.stop()
            drive.value = 0.7
            motor.forward()
            drive.value = 0.2
            sleep(0.05)
            motor.stop()

        elif button.is_pressed:
            indicador = True

def pos_inicial():
    global contador

```

```

while True:
    if button.is_pressed:
        contador += 1
        sleep(0.5) # timpos de pausa mientras se captura la imagen
        motor.stop()
        drive.value = 0.3
        motor.backward()
        sleep(0.1)
        drive.value = 0.2
        sleep(0.01)
        motor.stop()
        camera.annotate_text = "Foto #{}".format(contador)
        camera.capture('/home/pi/Desktop/IRcamera/images2.jpg'.format(contador))
        camera.stop_preview()
        print("Foto pos final tomada")

        sleep(0.01)
        motor.backward()

def main():
    # Setup MQTT client
    hilo1 = threading.Thread(target = retorno)
    hilo1.start()

```



```
hilo2 = threading.Thread(target = pos_inicial)

hilo2.start()

mqttc = mqtt.Client()

mqttc.username_pw_set(MQTT_USERNAME, password='')

mqttc.on_message = on_message

mqttc.on_connect = on_connect

mqttc.on_publish = on_publish

mqttc.on_subscribe = on_subscribe

# Uncomment to enable debug messages

# mqttc.on_log = on_log

mqttc.connect(BROKER_ENDPOINT, PORT, 60)

topic = "{}/{}/{/}/lv".format(TOPIC, DEVICE_LABEL, VARIABLE_LABEL)

print(topic)

mqttc.subscribe(topic, 0)

mqttc.loop_forever()

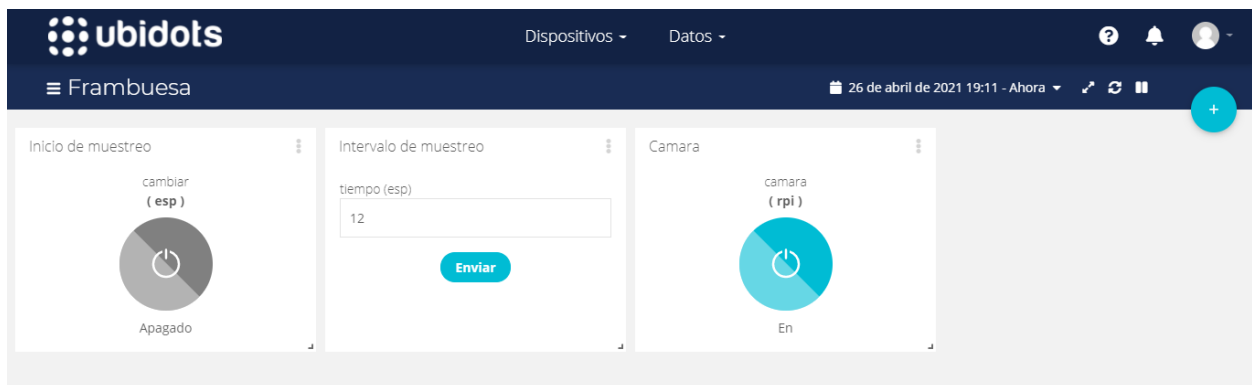
if __name__ == '__main__':

    main()
```

D. Manual de usuario.

Operación remota

La configuración del tiempo e inicio del muestreo, así como la orden para iniciar la toma de fotografías y accionar el mecanismo de brazo robótico para ubicación de la cámara, se hace a través del panel de control creado en la plataforma Ubidots, como se observa en la siguiente figura.



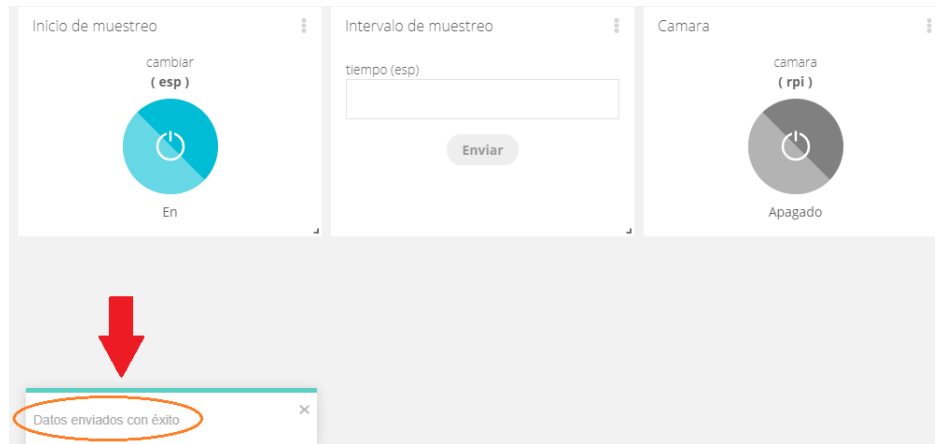
El procedimiento es el siguiente:

Ingresar a la página Ubidots con la cuenta y contraseña correspondientes

Dirigirse a Data (datos) y seleccionar Dashboards (Cuadros de mandos) inmediatamente se abrirá el panel de control con 3 cuadros.

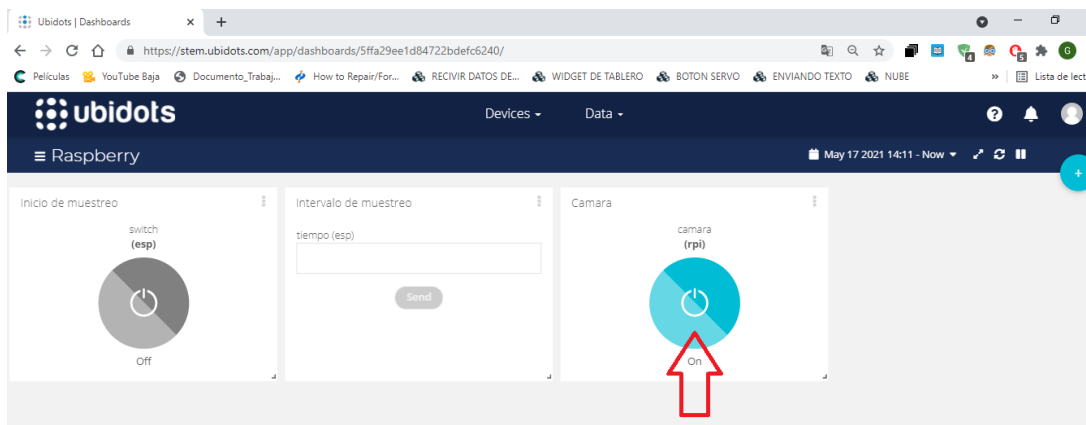
- Botón inicio de muestreo
- Intervalo de muestreo
- Cámara.

Lo primero que se debe hacer es configurar el intervalo de muestreo, este está limitado entre 1 a 60 minutos, posterior a esto presionar el botón enviar. Aparecerá entonces una ventana emergente confirmando el envío de dichos datos.



Paso seguido es activar el botón de inicio de muestreo pasándolo de off (apagado) a on (encendido). En este momento ya el sistema está realizando la toma de datos de acuerdo con los valores programados por el usuario. La visualización de dichos datos es como se observa en la Figura 37 donde posteriormente también se explica el procedimiento para descargar los respectivos *dataset*.

Para iniciar el proceso de la captura de imágenes se debe activar el botón de *cámara*. Este da inicio a un programa guardado en la Raspberry pi3 que se encargara de ejecutar las instrucciones para la toma de imágenes y ejecución de movimiento. La activación del botón se hace a voluntad del interesado y se captura la imagen de cada una de las dos caras.



Para visualizar las imágenes tomadas se debe acceder remotamente a la tarjeta Rasberry pi3 utilizando un programa dispuesto para hacer acceso remoto de dispositivos. Para el caso particular

de este proyecto se utilizó AnyDesk. Los archivos de imagen se pueden abrir en ese punto directamente o adjuntarlos a un correo para ser enviados.

E. Procedimiento calibración de sensores

El procedimiento de calibración se hizo mediante la comparación de las medidas de los sensores contra patrones de referencia calibrados, estos fueron instrumentos de medición facilitados por la empresa: Casa de control Wisconsin, quienes amablemente colaboraron con el préstamo.

En la toma de resultados se puede observar que el nivel de precisión en los elementos esta entre 0.2 a 0,3 lo cual es un margen de error bajo.



Sensor de temperatura.

Prueba:

Se somete tanto el instrumento de medición como el sensor a las siguientes condiciones.

Muestra 1 Temperatura ambiente.

Muestra 2 Temperatura 1

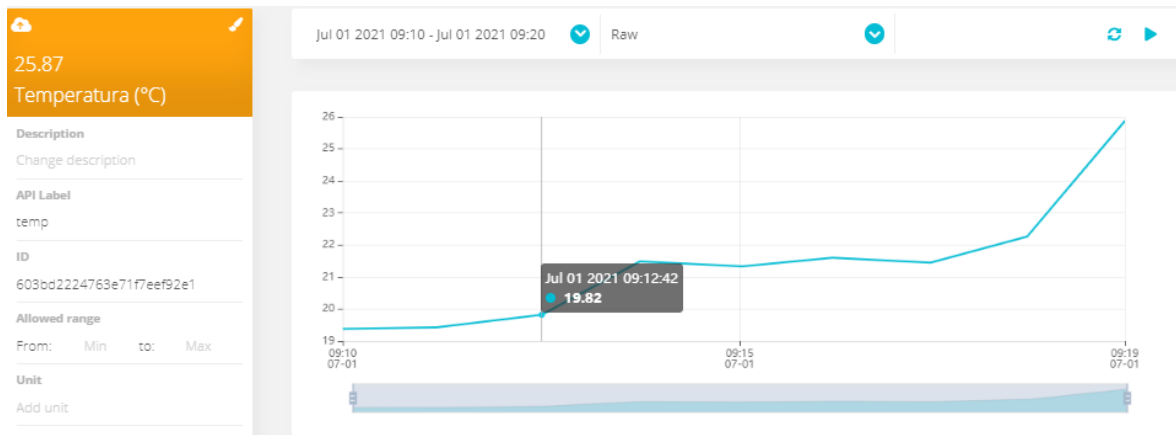
Muestra 3 Temperatura 2

Muestra 4 Temperatura 3

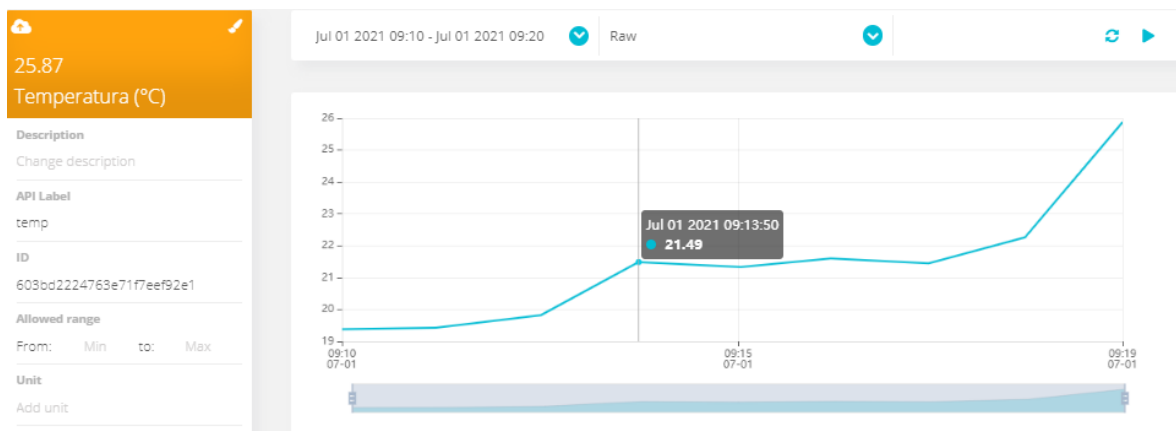
Datos obtenidos:

Muestra	Valor 510 CO METER. (°C)	Valor sensor DS18B20 (°C)
1	20.06	19.82
2	21.30	21.49
3	22.05	22.26
4	25.62	25.87

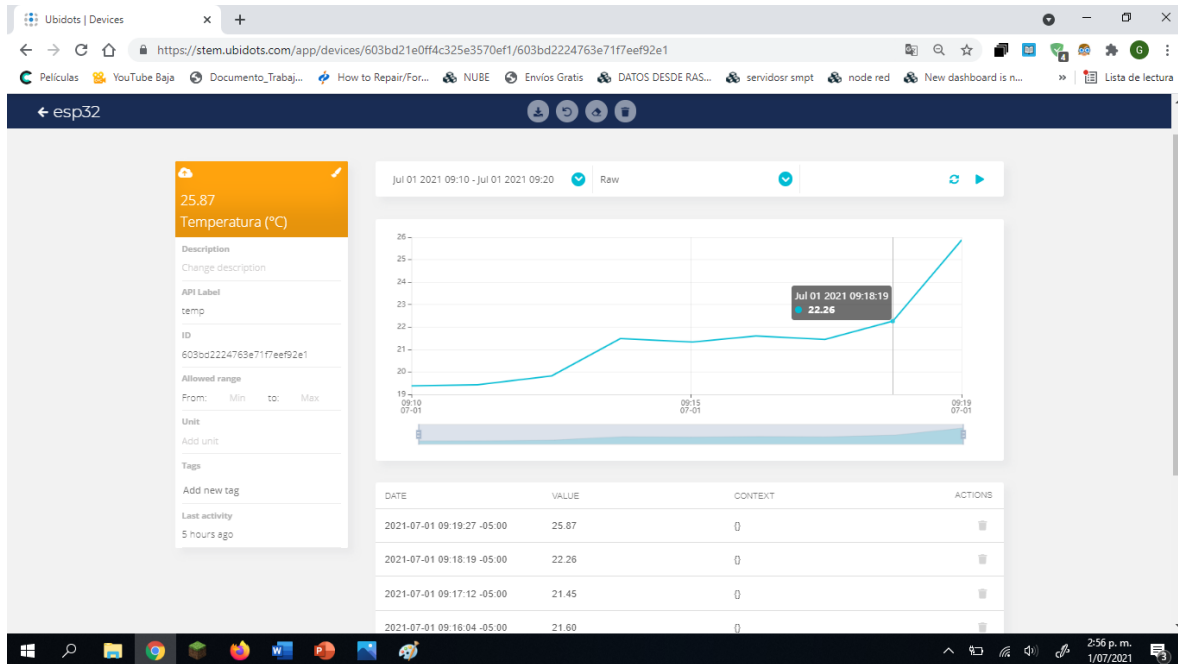
Muestra 1



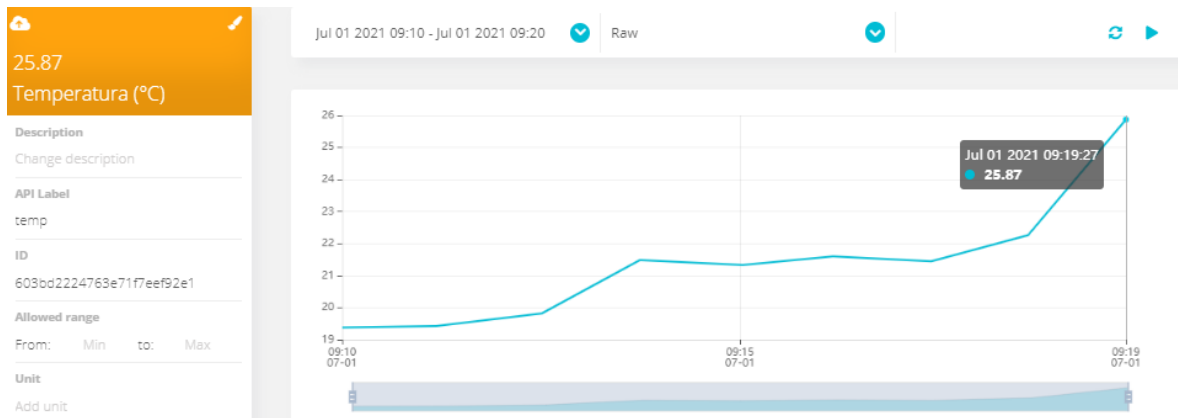
Muestra 2



Muestra 3



Muestra 4



Sensor de conductividad

Prueba:

Se somete tanto el instrumento de medición como el sensor a las siguientes condiciones.

Muestra 1, con 1 gm de sal.

Muestra 2, con 2 gm de sal.

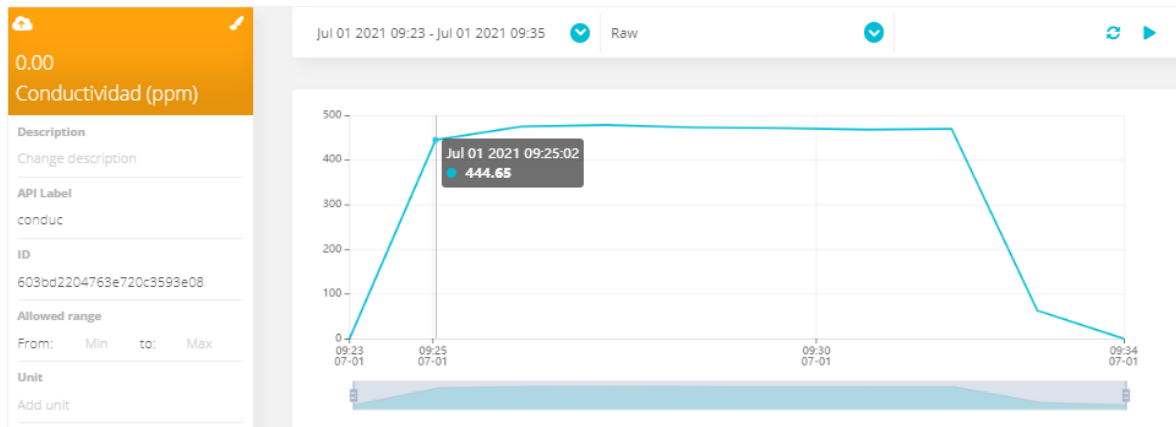
Muestra 3, con 3 gm de sal.

Muestra 4, agua sin sal.

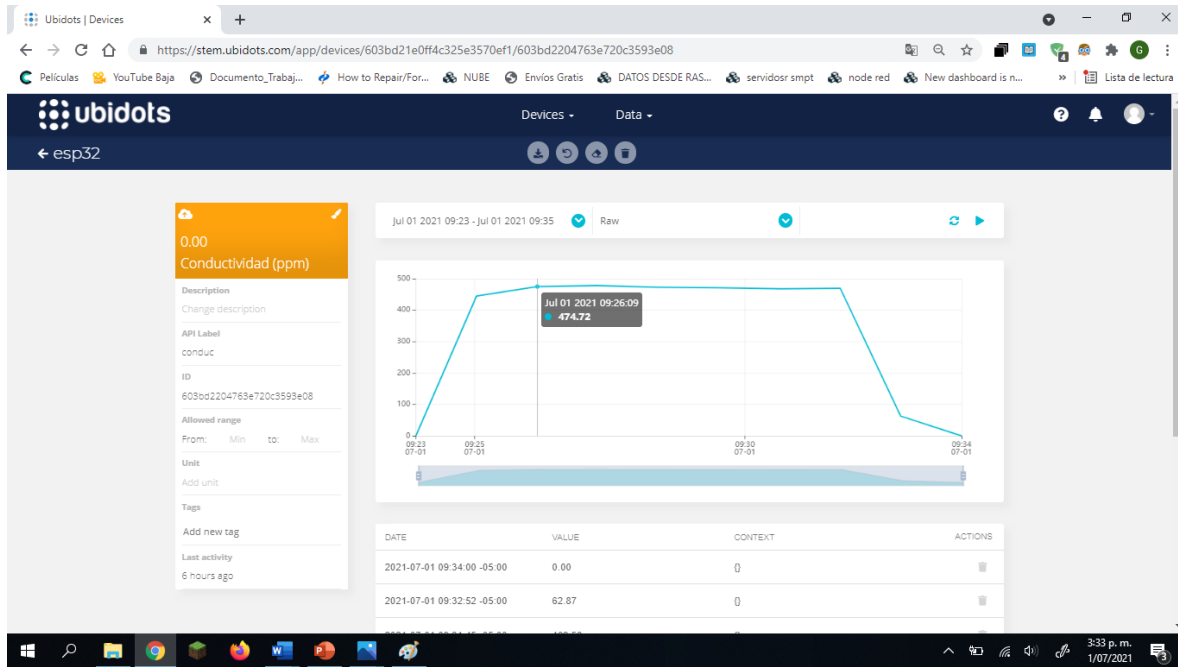
Datos obtenidos.

Muestra	Valor TESTER Model TDS-EZ. (ppm)	Valor sensor SEN0244 (ppm)
1	444.53	444.65
2	475.00	474.72
3	478.01	477.83
4	63.03	62.87

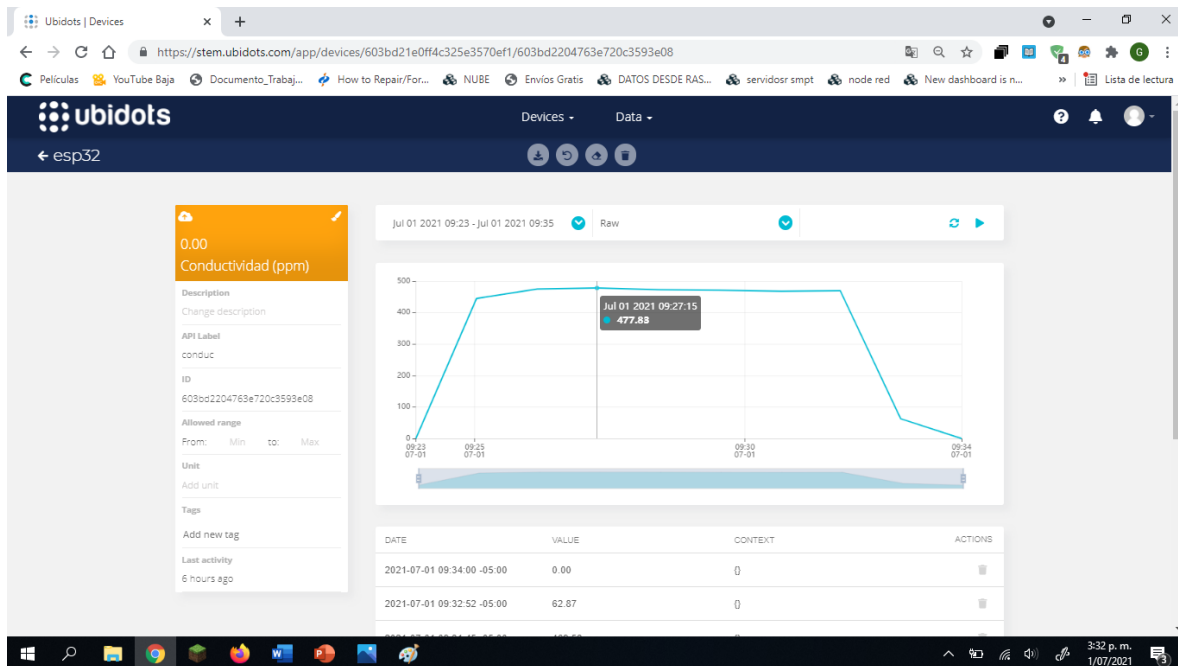
Muestra 1



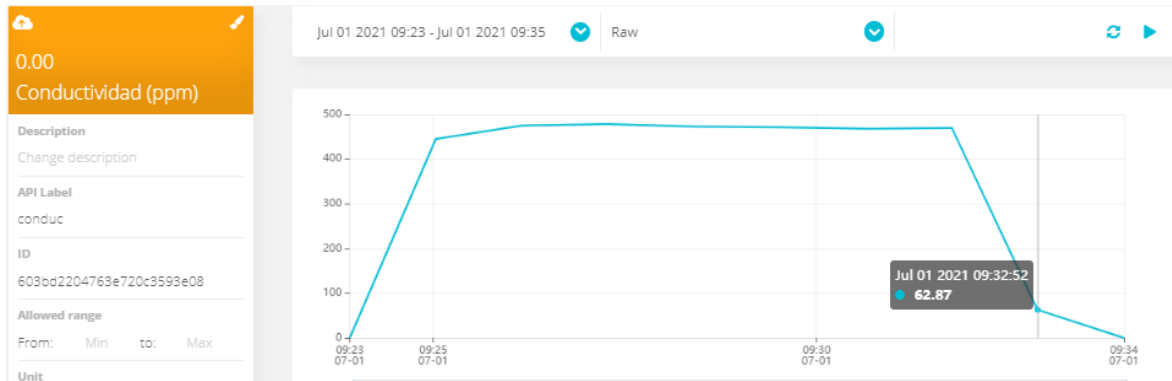
Muestra 2



Muestra 3



Muestra 4



Sensor de iluminación

Prueba:

Se somete tanto el instrumento de medición como el sensor a las siguientes condiciones.

Muestra 1 iluminación ambiente

Muestra 2 grado 1 de la linterna.

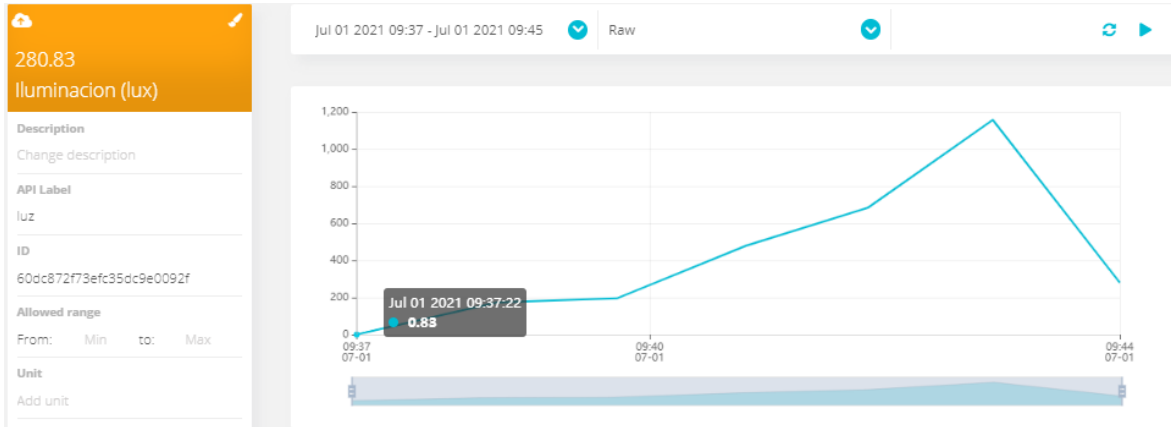
Muestra 3 grado 2 de la linterna.

Muestra 4 grado 3 de la linterna.

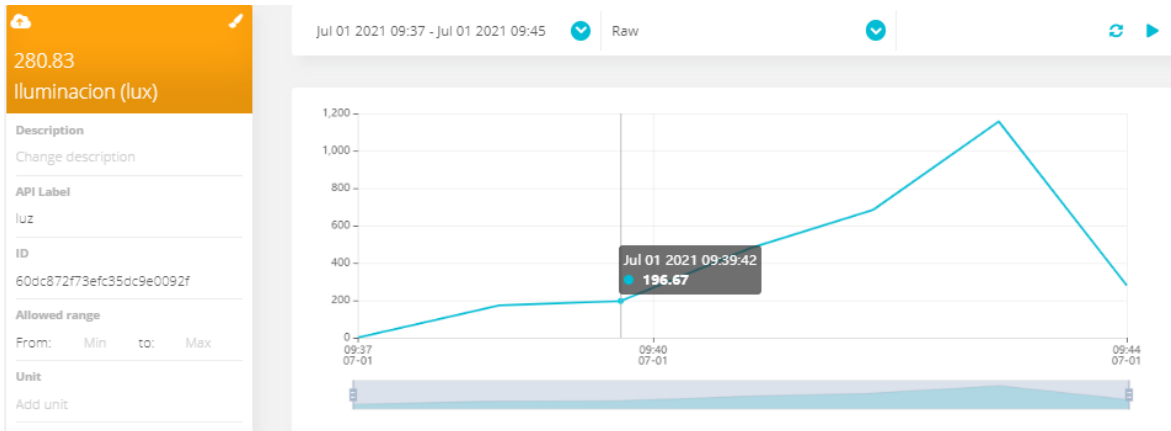
Datos obtenidos:

Muestra	Valor TESTER JT-813 (lux)	Valor sensor BH1750 (lux)
1	1.01	0.83
2	196.20	196.16
3	480.01	479.17
4	683.18	683.33

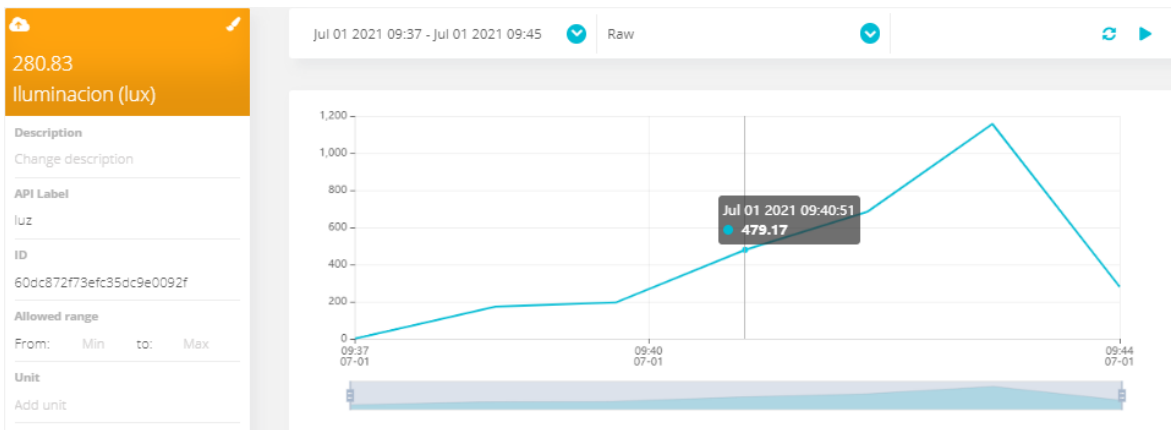
Muestra 1



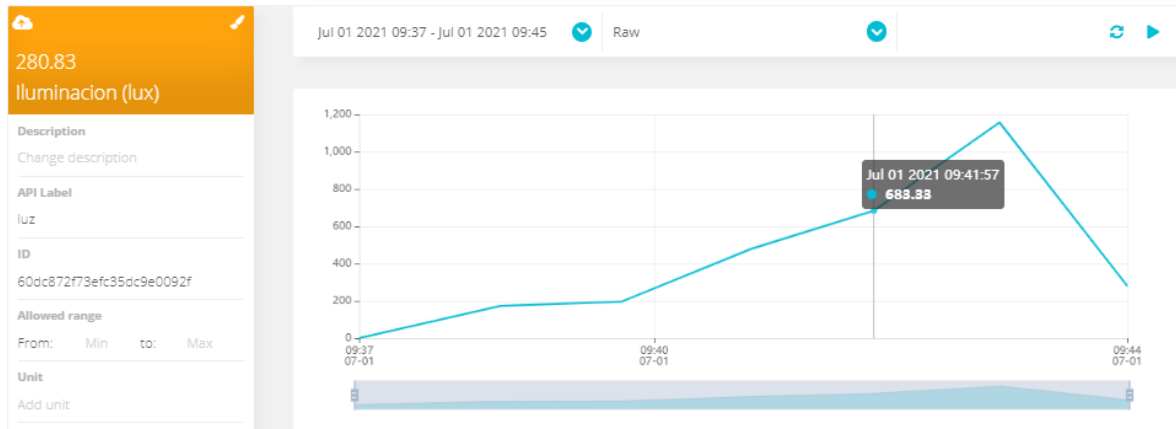
Muestra 2



Muestra 3



Muestra 4



Sensor de Humedad

Prueba:

Se somete tanto el instrumento de medición como el sensor a las siguientes condiciones.

Muestra 1 humedad ambiente

Muestra 2 humedad grado 1.

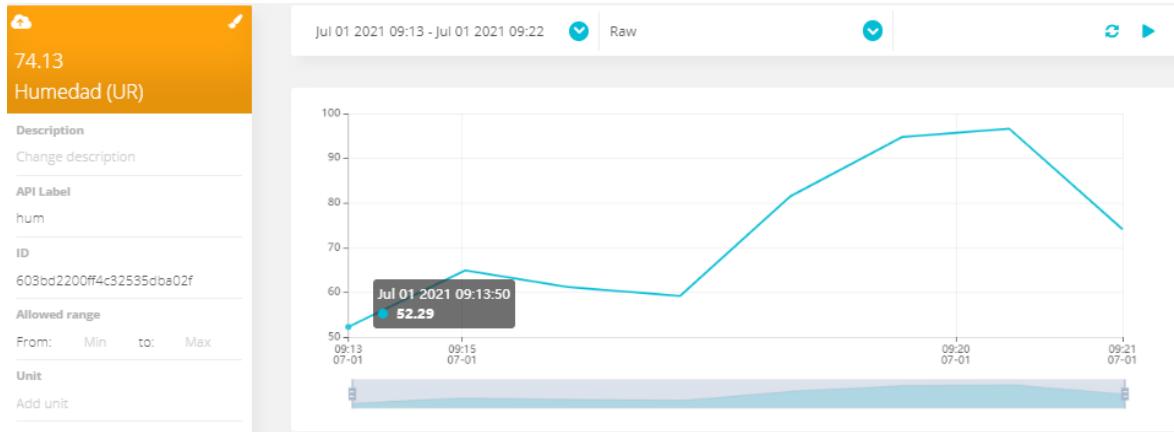
Muestra 3 humedad grado 2.

Muestra 4 humedad grado 3.

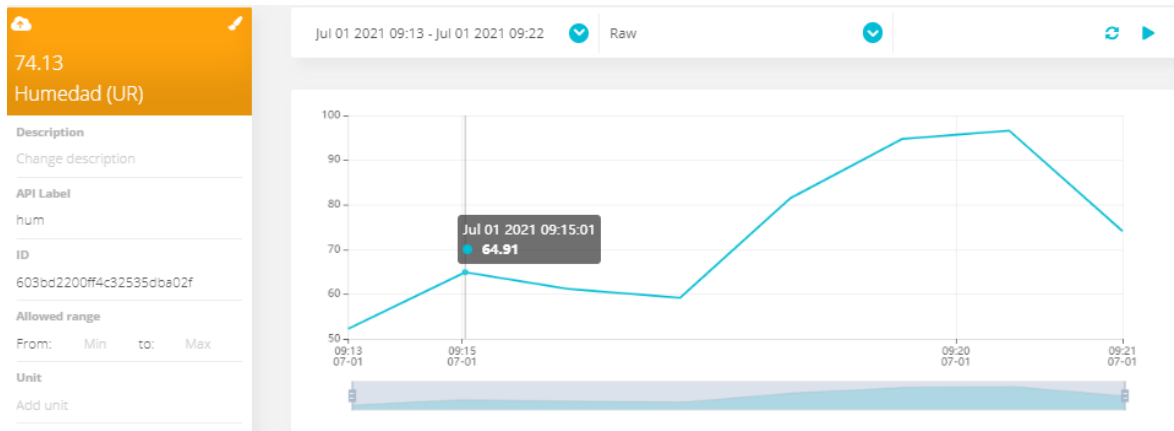
Datos obtenidos:

Muestra	Valor TESTER JT-813 (HR)	Valor sensor BME280 (HR)
1	52.41	52.29
2	65.12	64.91
3	81.22	81.47
4	94.91	94.73

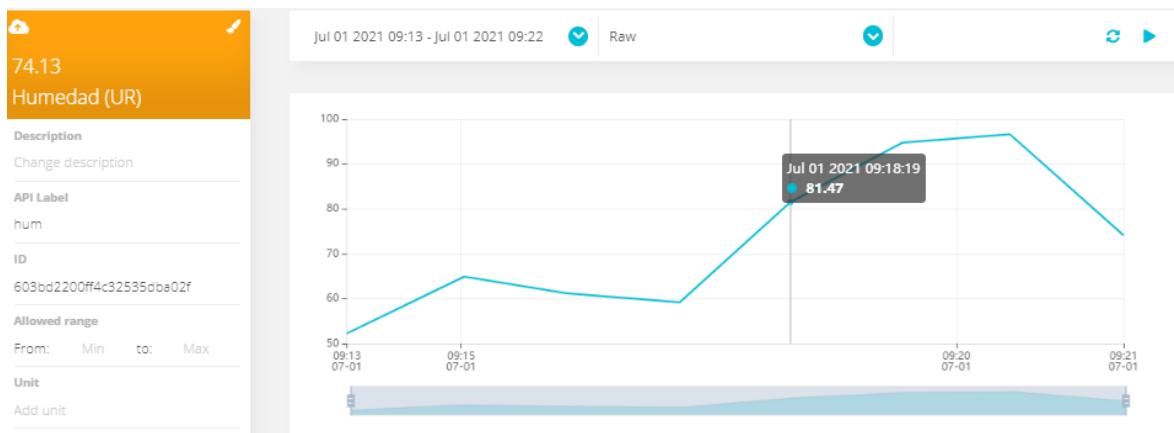
Muestra 1



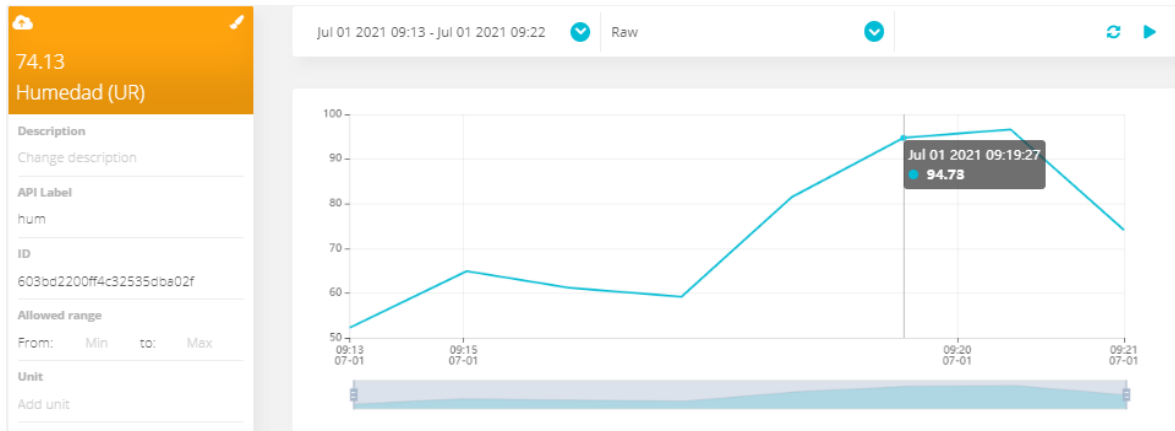
Muestra 2



Muestra 3



Maestría 4



Sensor de CO2

Prueba: Se somete tanto el instrumento de medición como el sensor a las siguientes condiciones.

Muestra 1 atmosfera ambiente

Muestra 2 atmosfera grado 1.

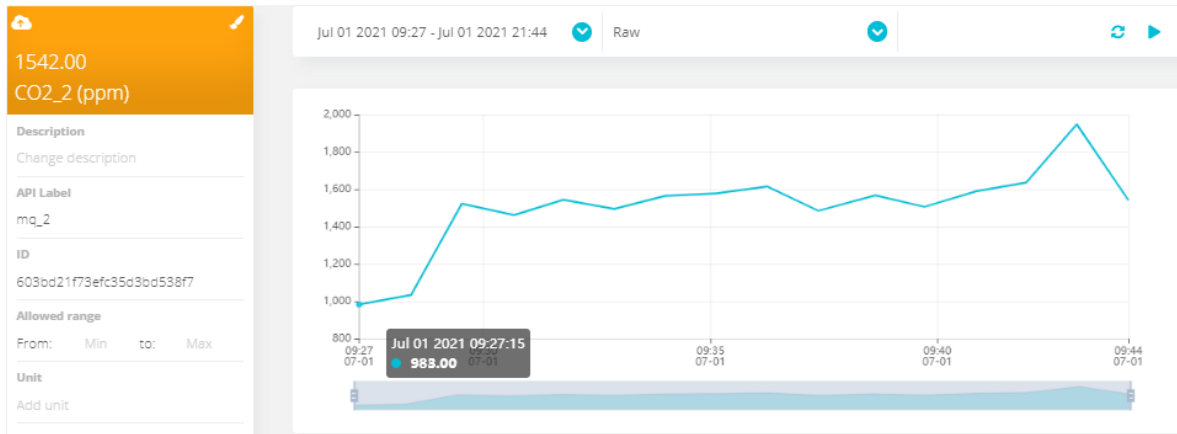
Muestra 3 atmosfera grado 2.

Muestra 4 atmosfera grado 3.

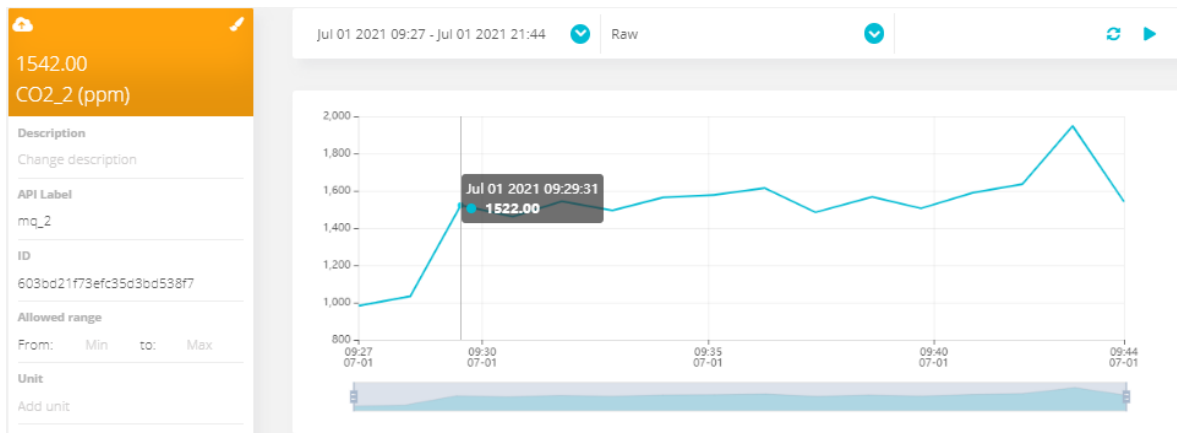
Datos obtenidos:

Muestra	Valor CENTER 510 CO METER (ppm)	Valor sensor MQ135 (ppm)
1	0	0.983
2	1.631	1.522
3	1.597	1.615
4	2.001	1.948

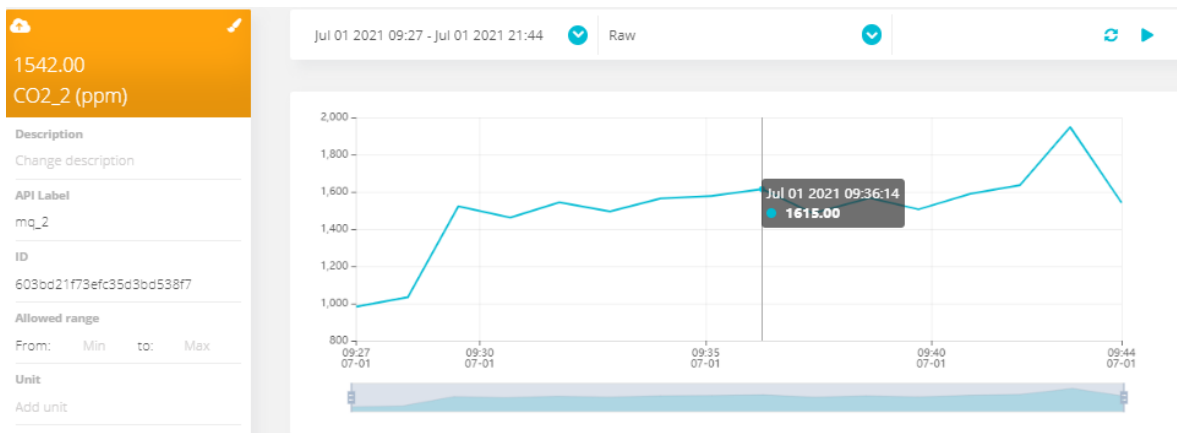
Muestra 1



Muestra 2



Muestra 3



Muestra 4

