

**Análisis Del Estado Del Arte Del Internet De Las Cosas Aplicado A Cultivos
Aeropónicos E Hidropónicos A Nivel Nacional E Internacional**

Juan Esteban Tapias Baena

**Universidad Nacional Abierta Y A Distancia Unad
Escuela De Ciencias Básicas Tecnología E Ingeniería
Ibagué
2021**

**Análisis Del Estado Del Arte Del Internet De Las Cosas Aplicado A Cultivos
Aeropónicos E Hidropónicos A Nivel Nacional E Internacional**

Juan Esteban Tapias Baena

**Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Especialista En Redes De Nueva
Generación**

**Director De Trabajo de Grado
Raul Camacho Bríñez**

**Universidad Nacional Abierta Y A Distancia Unad
Escuela De Ciencias Básicas Tecnología E Ingeniería
Ibagué - Tolima
2021**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ibagué, diciembre 2021

Dedicado a mis padres, mis amigos, mi familia y la gente que siempre me ha apoyado.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios por Su Eterna Sabiduría y Gracia dadas para concluir esta labor. También dedico este trabajo a las personas que siempre me han acompañado en esta larga carrera. Que han estado conmigo en todo momento.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 2. OBJETIVOS..... | 14 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 14 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 15 |
| 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 15 |
| 3.2 JUSTIFICACIÓN | 21 |
| 4 MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL..... | 27 |
| 5 MARCO TEÓRICO..... | 30 |
| 5.1 <i>Definiciones de IoT</i> | 30 |
| 5.2 <i>Comienzos de IoT</i> | 34 |
| 5.3 <i>Dispositivos IoT</i> | 36 |
| 5.4 <i>Protocolos en IoT</i> | 37 |
| 5.5 Breve revisión de la industria 4.0. | 38 |
| 5.6 Tecnología LoRa | 40 |
| 5.7 Definición e historia de la Hidroponía..... | 47 |
| 5.8 Definición e historia de la Aeroponía..... | 53 |
| 5.9 Arquitectura Tecnológica del IoT..... | 57 |
| 6. REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE DE IOT APLICADO A HIDROPONÍA Y AEROPONÍA A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL..... | 65 |
| 6.1 Introducción..... | 65 |
| 6.2 <i>Campos de aplicación de IoT en agricultura de precisión</i> | 65 |
| 6.3 <i>IoT aplicado en cultivos de invernadero</i> | 67 |
| 6.4 <i>Software de código abierto para la gestión agrícola</i> | 68 |
| 6.5 <i>Componentes electrónicos en sistemas IoT aplicados a la agricultura</i> | 69 |
| 6.6 INTERNACIONAL | 70 |
| 6.7 NIVEL NACIONAL..... | 82 |
| 7. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE EN PUBLICACIONES, E INVESTIGACIONES SOBRE PROYECTOS IOT APLICADO A CULTIVOS AEROPÓNICOS E HIDROPÓNICOS Y TRABAJOS FUTUROS..... | 87 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 7.1 | <i>SISTEMÁTICA DE LITERATURA</i> | 87 |
| 7.2 | SÍNTESIS DEL ESTADO DEL ARTE | 90 |
| 7.3 | <i>ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN EL ESTADO DEL ARTE</i> | 97 |
| 8. | TRABAJOS FUTUROS Y CAMPO DE ACCIÓN..... | 104 |
| | CONCLUSIONES..... | 108 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 111 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Comparación tecnologías para IoT..... | 33 |
| Tabla 2. Canales y parámetros para Lora WAN..... | 44 |
| Tabla 3. Configuración y tasas de datos en LoRa WAN..... | 44 |
| Tabla 4. Canales y frecuencias de trabajo LoRa en algunas regiones del mundo..... | 47 |
| Tabla 5. Conclusiones de comparativa. | 73 |
| Tabla 6. Comparación de cultivo aeropónico y cultivo en tierra Autores..... | 83 |
| Tabla 7. Síntesis del estado del arte..... | 90 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1. Curva de crecimiento poblacional en Colombia 2005-2017..... | 16 |
| Figura 2. Curva de proyección crecimiento poblacional en Colombia 2018-2070..... | 16 |
| Figura 3. Capas de IoT. | 31 |
| Figura 4. Componentes básicos de IoT..... | 32 |
| Figura 5. Línea de tiempo. Evolución de IoT..... | 36 |
| Figura 6. Topología de una red LoRa WAN | 41 |
| Figura 7 Clases de dispositivos en LoRa WAN.. .. | 45 |
| Figura 8. Representación de los jardines colgantes. | 50 |
| Figura 9. Representación de los jardines flotantes..... | 51 |
| Figura 10. Vistas de la arquitectura IoT..... | 58 |
| Figura 11. Vista de negocio en la arquitectura soportada en IoT..... | 59 |
| Figura 12. Diagrama de vista funcional en IoT. | 60 |
| Figura 13. Arquitectura soportada en IoT..... | 60 |
| Figura 14. Red WSN propuesta por (Sivamani, Bae, & Cho, 2013) | 61 |
| Figura 15. Modelo de invernadero inteligente | 62 |
| Figura 16. Arquitectura propuesta por (Bauer & Aschenbruck, 2018)..... | 63 |
| Figura 17. Arquitectura propuesta IoT..... | 63 |
| Figura 18. Campos de aplicación de IoT en agricultura de precisión..... | 65 |
| Figura 19. Red WSN para monitoreo de SHM | 67 |
| Figura 20. Diagrama de bloques de la solución..... | 72 |
| Figura 21. Sistema IoT de supervisión aeropónico..... | 74 |
| Figura 22. Arquitectura IoT propuesta para la solución | 75 |
| Figura 23. Diseño del sistema aeropónico | 76 |
| Figura 24. Diagrama esquemático del funcionamiento del proyecto..... | 78 |
| Figura 25. Diagrama esquemático del funcionamiento del proyecto | 79 |
| Figura 26. Arquitectura esquemática del sistema..... | 82 |
| Figura 27. Descripción general de las conexiones del sistema | 84 |
| Figura 28. Gráfico de publicaciones sobre IoT en la agricultura | 87 |
| Figura 29. Gráfico de publicaciones sobre IoT en sistemas aeropónicos | 88 |
| Figura 30. Gráfico de publicaciones sobre IoT en agricultura 2012-2021 | 88 |
| Figura 31. Gráfico de publicaciones sobre IoT en sistemas aeropónicos 2012-2021 | 89 |
| Figura 32. Recolección de datos mediante variables. En los proyectos internacionales..... | 97 |
| Figura 33. Recolección de datos mediante variables. En los proyectos nacionales | 98 |
| Figura 34. Gráfico de porcentajes en sistemas embebidos Internacionales | 99 |
| Figura 35. Gráfico de porcentajes en sistemas embebidos Nacionales..... | 99 |
| Figura 36. Porcentaje de Software de Visualización Utilizado a nivel Internacional..... | 100 |
| Figura 37. Porcentaje de Software de Visualización usado | 101 |
| Figura 38. Porcentaje de protocolos usado | 102 |
| Figura 39. Porcentaje de protocolos de red usado | 103 |
| Figura 40. Gráfico comparativo de tecnologías inalámbricas, potencia versus distancia..... | 104 |

RESUMEN

Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de Naciones Unidas (ONU) para el año 2030 es el hambre cero. Actualmente la problemática del hambre amenaza a muchas personas en Colombia y en el mundo. Por esta razón, desde los diferentes liderazgos del mundo y desde el Gobierno Nacional de Colombia se ha venido trabajando fuertemente en iniciativas que fomenten la tecnología dentro del sector agrícola para generar mayores producciones a menor costo. Es en ese contexto donde las técnicas de cultivo alternativas a los cultivos tradicionales (en tierra) como los aeropónicos e hidropónicos (también denominados cultivos “urbanos” debido a que no requieren tierra para su desarrollo), han tomado mucho auge, ya que permiten una gran integración de tecnologías como el internet de las cosas para el monitoreo y control de los factores que afectan al crecimiento y rendimiento del cultivo, redundado en altos niveles de beneficios para los productores. Debido a lo anterior, el presente trabajo propone un estudio y análisis de la aplicación de las tecnologías de IoT en cultivos aeropónicos e hidropónicos a nivel internacional y nacional que permita determinar los beneficios y los nuevos desafíos que se pueden generar a partir de la aplicación de tecnologías IoT en cultivos aeropónicos e hidropónicos.

PALABRAS CLAVE: Internet, Redes, cultivos alternativos, tecnología, agroindustria.

ABSTRACT

One of the Sustainable Development Goals of the United Nations (UN) for the year 2030 is zero hunger. Currently, the problem of hunger threatens many people in Colombia and in the world. For this reason, the different leaderships of the world and the National Government of Colombia have been working hard on initiatives that promote technology within the agricultural sector to generate higher productions at a lower cost. It is in this context where alternative cultivation techniques to traditional crops (on land) such as aeroponics and hydroponics (also called "urban" crops because they do not require land for their development), have become very popular, since they allow a great integration of technologies such as the internet of things for the monitoring and control of the factors that affect the growth and yield of the crop, resulting in high levels of benefits for the producers. Due to the above, the present work proposes a study and analysis of the application of IoT technologies in aeroponic and hydroponic crops at an international and national level that allows determining the benefits and new challenges that can be generated from the application of IoT technologies in aeroponic and hydroponic crops.

KEY WORDS: Internet, Networks, alternative crops, technology, agribusiness.

1. INTRODUCCIÓN

El internet de las cosas es sin lugar a dudas una de las tecnologías que más ha impactado en la industria actualmente, cambiando las formas, metodologías y capacidades de producción. Ya desde el año 2011 Dave Evans, chief futurist, director senior de Cisco, y designado por LinkedIn como uno de los 150 líderes de pensamiento más influyentes del mundo, pronosticaba a través del informe “*Internet de las cosas cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*”. Este cambio que trae internet de las cosas es posible gracias a la capacidad de reunir, analizar y distribuir los datos que pueden volverse en información y luego en sabiduría gracias a la facultad que la información nos brinda para tomar decisiones acertadas. (Evans, 2021) Uno de los sectores más importantes para el internet de las cosas es el agrícola, donde IoT ha tenido un impacto fuerte en las formas de comunicación e información. Al IoT aplicado en la agricultura se le conoce como *agricultura inteligente* ya que brinda la posibilidad al agricultor de realizar gestiones de una forma más eficiente. (Silvestre & Salazar, 2019)

Otro beneficio importante que IoT permite al sector agrícola es el desarrollo de técnicas de cultivo alternativas a las tradicionales de cultivo en tierra. Dos de las técnicas alternativas más representativas por sus ventajas frente a los cultivos en tierra son los cultivos aeropónicos e hidropónicos, que requieren ampliamente del uso de tecnologías como IoT para poder desarrollarse y poder realizar tareas de control, y monitoreo. Estos cultivos permiten crecimientos de plántulas con una baja o nula concentración de pesticidas, ahorros de recurso hídrico, mayores producciones por metro cuadrado, una gran sostenibilidad, entre otros beneficios; y se perfilan como la alternativa de cultivo más importante para el futuro próximo. (Gimeno, 2016)

Teniendo como contexto lo anterior, el presente proyecto plantea la elaboración de un estado del arte mediante el análisis y revisión de las tecnologías de internet de las cosas empleadas en cultivos aeropónicos e hidropónicos a nivel nacional e internacional, que permita determinar sus beneficios e impacto, y temas de investigación que puedan desarrollarse en el campo de internet de las cosas aplicado a estos cultivos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar el estado del arte de las tecnologías de internet de las cosas empleadas en cultivos aeropónicos e hidropónicos a nivel nacional e internacional, que permita determinar sus beneficios e impacto, y áreas de investigación.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar la información y literatura más ~~importante~~ destacada sobre proyectos y técnicas de internet de las cosas aplicadas a cultivos alternativos en Colombia y el mundo.
- Analizar detalladamente las tecnologías IoT aplicadas a cultivos aeropónicos e hidropónicos clasificando cada una de ellas acorde a su impacto en la región.
- Comparar los beneficios de la aplicación de tecnologías de IoT en cultivos aeropónicos e hidropónicos según su impacto y desarrollo.
- Determinar temas de investigación en los que se deba trabajar respecto al campo de internet de las cosas aplicado a cultivos aeropónicos e hidropónicos.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

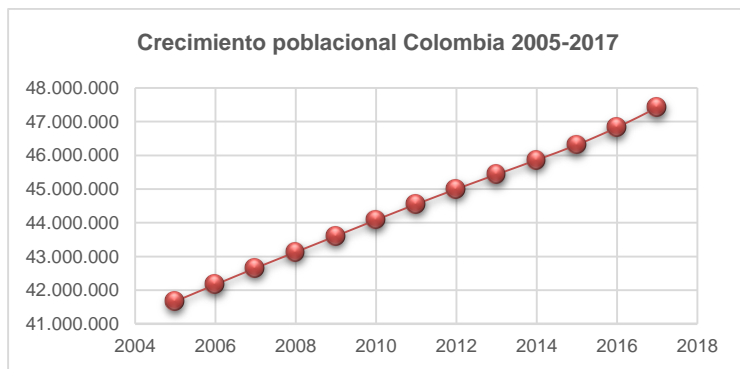
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Estimaciones actuales indican que más de 690 millones de personas en el mundo pasan hambre y esto se ha acrecentado con la crisis sanitaria producto del COVID 19. También se estima que más de 250 millones de personas están al borde de la hambruna. (Organización de naciones unidas, 2021). Por otro lado, según un informe de infobae en octubre de 2020, se indicaba que en Colombia más de 2.7 millones de personas sufren hambre crónica y más de diez millones de personas tienen un consumo ineficiente de alimentos; situación que también ha empeorado con la aparición de la crisis sanitaria producto del COVID-19. (Infobae, 2020).

El problema de la demanda alimenticia en el mundo se debe principalmente al exponencial crecimiento de la población. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación estima que, para poder satisfacer la demanda alimenticia en 2050 y que implica un crecimiento aproximado de 2300 millones de personas más, se deben producir al menos un 70% adicional de alimentos que se producen actualmente (FAO, 2009) y superar los retos de escasez de recursos naturales, presión ejercida por el cambio climático y expansión de fronteras agrícolas. (Giraldo, 2020)

Por otro lado, en Colombia, el crecimiento poblacional según el DANE desde el año 2005-2017 ha aumentado en un 13.8 %. Se pasó de tener 41.671.878 habitantes en 2005 a tener 47.419.200 de habitantes en 2017 como lo evidencia la siguiente figura:

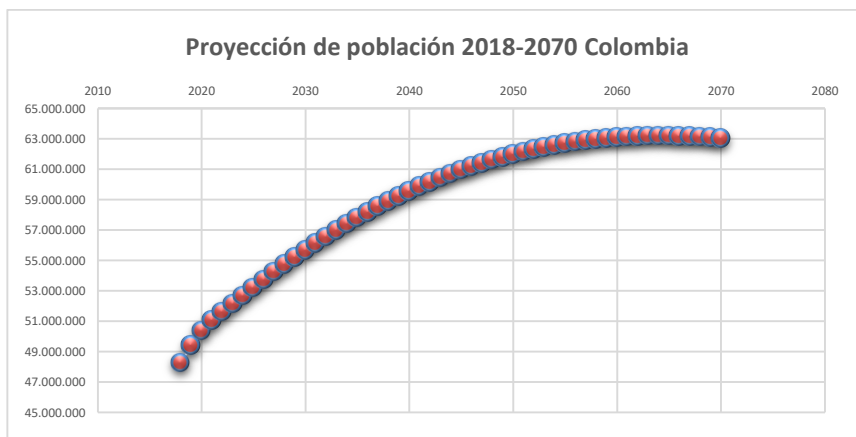
Figura 1.
Curva de crecimiento poblacional en Colombia 2005-2017



La proyección 2018-2070 del DANE plantea que para el año 2070 se tendrá un total de 63.023.334 de personas en nuestro país, esto implica un aumento del 23.5% con respecto a los 51.049.498 de personas que se proyectan tener al término de 2021.

La siguiente figura muestra la evolución de esta proyección:

Figura 2.
Curva de proyección crecimiento poblacional en Colombia 2018-2070



Esto evidentemente muestra la tendencia cada vez más generalizada al crecimiento poblacional y por ende una mayor demanda alimenticia. Pero el problema radica en que cada vez aumentan más los obstáculos problemas asociados al sector agrícola que reducen la producción alimentaria. El primero de ellos es la falta de mano de obra, debido a que ésta disminuye día con día gracias a varios factores como

envejecimiento del campesino, falta de interés de las nuevas generaciones por el campo, y falta de apoyo por parte del gobierno (Martínez, 2015).

Un artículo del diario la República en 2015 revelaba varios problemas más que afectan la producción agrícola derivados de la tierra; en primer lugar, en Colombia solo se tienen 7.1 millones de hectáreas de tierra cultivadas versus los 22 millones de hectáreas posibles por cultivar; en segundo lugar, el 80% de esta tierra cultivable está concentrada en pastos para ganadería y no para agricultura. Si esto sumamos otros problemas más derivados de las formas y técnicas de cultivo, problemas de exportaciones y la problemática de que para el año 2015 solo el 7% de las vías donde se genera la producción agrícola en el país estaban pavimentadas (Delgado, 2015) podremos ver que los cultivos en tierra no tienen la capacidad para asumir la alta demanda alimenticia ya descrita, y que empieza a hacerse notar.

No hay lugar a dudas de que el modelo de agricultura que se ha venido desarrollando en los últimos años está llegando a sus límites físicos, ecológicos y sociales. Según un informe del instituto de estudios urbanos de la Universidad Nacional de Colombia, que cita la encuesta nacional Pulso Social del DANE en febrero 2021, mostró que 2,4 millones de hogares ingieren menos de 3 comidas al día; 2,2 millones de familias comen dos veces al día y 179,174 hogares una vez al día. (Medellín, 2021). Esto, desde luego, muestra una problemática fuerte en cuanto a la cuestión de hambre en el país que necesita una solución adecuada, la cual debe focalizarse en aumentar la producción agrícola, aumentando la productividad de los cultivos y para ello se requiere del uso correcto de los recursos. (Dholu & Ghodinde, 2018). Y esto solo puede

lograrse adoptando nuevas tecnologías en este sector, que permitan llegar a un aumento de productividad sostenible. (Ministerio de agricultura Colombia, 2006)

IBM en su informe 5 en 5 presentado en el evento think 2019 en San Francisco indica que las tecnologías están ayudando a los agricultores a maximizar los rendimientos de los cultivos; y que entre las tecnologías más importantes que permiten estas mejoras, está el internet de las cosas, que genera calidad en los alimentos, incrementos de productividad, y seguridad alimentaria. Respecto a esto, Jorge Vergara, gerente de tecnología e innovación de IBM en Colombia, indicó que Colombia al ser un país con un sector agrícola importante, las tecnologías emergentes, como el IoT, son fundamentales para dar un mayor monitoreo, ahorro de costos, y un mejor manejo ambiental. (Porfatolio, 2019)

Es en este contexto donde el Gobierno Nacional de Colombia ha desarrollado esfuerzos por implementar tecnologías emergentes al sector productor agrícola. En el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, el Gobierno Nacional indica que para el 2016 tan sólo un 9% de las empresas colombianas tenían implementado IoT en sus procesos productivos, debido a lo anterior, se diseñó el pacto por el emprendimiento, formalización y productividad, el cual busca promover la tecnología de punta en las empresas, incentivar la innovación y facilitar la economía para lograr estas adopciones de tecnologías por parte de las empresas productoras. (Gobierno de Colombia, 2018)

Ahora, enfocándonos en el sector agrícola, el Gobierno Nacional a través del plan TIC 2018-2022, ha ido fortaleciendo este sector mediante el impulso hacia la transformación digital e industria 4.0, fomentando el grado de adopción de tecnología de las empresas colombianas y el campesinado. Esta integración de tecnología implica

en mejoras de calidad, crecimiento, cantidad y rendimiento de los cultivos, ya que es necesario monitorear, medir y controlar las variables claves que permiten un óptimo desarrollo de la planta. (Gobierno de Colombia, 2018)

El ministerio de agricultura de Colombia se plantea como metas el desarrollo de aplicaciones relevantes para la mejora de la productividad e ingresos de los agricultores, consolidación de plataformas públicas de información agrícola, apoyo de las tecnologías de información para prestar mejores servicios a los agricultores, y apropiación de tecnologías de información través del desarrollo de habilidades TIC (MinTIC, 2018). También, desde el Gobierno Nacional en cabeza del proyecto de inversión de la oficina TIC 2020-2023 se plantea como objetivo “Fortalecimiento de la Gestión de Tecnologías de la Información – TI en el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en función de la transformación digital del sector agropecuario”.

Una de las tecnologías que mejor representa esta transformación digital mediante la industria 4.0, es el Internet de las cosas, que ha abierto la puerta al desarrollo de cultivos alternativos a los cultivos en tierra, también denominados cultivos urbanos. Dentro de estas categorías, los más representativos son las técnicas de cultivo aeropónicos e hidropónicos dada su dependencia de las tecnologías de control y monitoreo para su implementación.

La aeroponía es una técnica que consiste en cultivar diferentes plantas sometidas a altos niveles de humedad que es proporcionada gracias a la nebulización, o micro aspersión de la solución nutritiva directamente en la raíz lo que permite que éstas se hidraten, estando en contacto con el aire, y con los nutrientes todo el tiempo. Por su parte, la hidroponía consiste en sumergir la raíz en la solución nutritiva. Estos

dos sistemas dependen de altos niveles de tecnología para funcionar (Intagri, 2017) y además se han popularizado gracias a su facilidad de manejo, a la no necesidad de tierra para cultivar (razón por la cual han sido muy aceptados en entornos urbanos), y por sus innumerables ventajas como ahorro de recurso hídrico, mayores velocidades de producción, generación de productos orgánicos, control focalizado de plagas, etc.

A nivel nacional e internacional el uso de cultivos aeropónicos e hidropónicos se ha venido masificando debido a las bondades antes mencionadas y se han constituido en pieza fundamental en planes de gobierno, desarrollos científicos, y políticas empresariales.

Un ejemplo de ello ocurrió en 2019 cuando el Gobierno de México aprobó el proyecto decreto de las Comisiones Unidas de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Rural; y de Estudios Legislativos, que reforma el artículo 3° de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable para que los cultivos hidropónicos sean regulados para favorecer su práctica y desarrollo, y que esto repercuta positivamente en la producción primaria de alimentos suficientes e inocuos y se generen más ingresos económicos para quienes se dediquen a su producción y comercialización (Gobierno de México, 2019).

En Newark, New Jersey, la empresa Aerofarms desarrolló una granja vertical con 6500 metros cuadrados de superficie sin ningún contacto con el suelo o sol, haciendo uso de técnicas de cultivos aeropónicos, para el año 2016 ya estaban dando sus primeros resultados. En Holanda la compañía Staay Food Group instaló la primera granja vertical comercial en Dronten. En Japón la catástrofe de Fukushima aceleró la construcción de granjas de cultivo aeropónicas para garantizar la seguridad alimentaria

del país, un ejemplo de esto es la granja Mirai ubicada en Miyagi donde se producen más de 10.000 lechugas al día haciendo uso de tecnologías IoT. Por último, en España se han implementado cultivos eficientes y sostenibles basados en centros de investigación agronómica para poder mejorarlos. (Llorente, 2020)

Debido a lo anterior, se hace necesario revisar el estado del arte del internet de las cosas aplicado a cultivos aeropónicos e hidropónicos en Colombia y en el mundo, con el fin de dar solución al siguiente interrogante de investigación:

¿Cuáles son los beneficios de la aplicación de IoT en cultivos aeropónicos e hidropónicos, y su impacto en cuanto a rendimiento para el agricultor a nivel nacional e internacional?

3.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente existe una tendencia a automatizar los trabajos agrícolas siguiendo una línea de evolución tecnológica y expansión poblacional en el mundo. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura:

“La mecanización agrícola puede aumentar la productividad tanto de la tierra como de la mano de obra, incluso en las explotaciones agrícolas en pequeña escala (...) Las tecnologías de la información y la comunicación modernas ofrecen a los agricultores múltiples opciones para comprar insumos, vender productos y mejorar su acceso a la información” (FAO, 2017)

Una de las tecnologías más importantes que permiten esta automatización es el Internet de las cosas. Definido como “la interconexión en red de todos los objetos cotidianos, que a menudo están equipados con algún tipo de inteligencia” (Salazar &

Silvestre, Internet de las cosas, 2020). Es en este sentido donde el sector agrícola promete ser el principal campo de acción del internet de las cosas en la próxima década y las soluciones que plantea son un paso importante a seguir en la modernización que se requiere gracias a la demanda del campo y sector agrícola. (Medela, Cendón, González, Crespo, & Nevares, 2013).

Un estudio realizado por investigadores chinos denominado “The Research of IoT of Agriculture based on Three Layers Architecture” en 2016 indica que el IoT es la clave para lograr el aumento en la producción agrícola necesario para incrementar en un 70% la producción global de comida, lo que sería un impacto muy positivo para el año 2050 donde se plantean tener en el mundo más de 9.5 billones de personas (College of Arts and Science Yangtze University, 2016). Lo anterior es evidente ya que el rápido desarrollo del internet de las cosas ha creado cambios fundamentales en todos los sectores de la industria, y particularmente en la agricultura gracias a la recopilación, almacenamiento, y comunicación de datos que generan la conocida como agricultura inteligente. El concepto de agricultura inteligente se refiere al uso, integración y despliegue de las últimas tecnologías como el internet de las cosas en la agricultura con el objetivo de aumentar la cantidad y calidad de los cultivos en cosechas. (Rawidean, 2020)

Estos cambios están reorientando los métodos de agricultura existente y creando una nueva tendencia de oportunidades. La demanda alimenticia necesita ser suplida y para ello las actividades tienen que automatizarse. IoT es una solución eficiente y rentable para el sector agrícola. Según la consultora Gartner el sector IoT se

estimaba creciera cerca de los 457 mil millones de dólares en 2020(Puranik, Sharmila, Ranjan, & Kumari, 2019). El motivo de este crecimiento obedece a varias razones:

- Proporcionan conectividad a una amplia gama de dispositivos. Que van desde móviles, tabletas, y TV basados en Android y iOS hasta casi cualquier cosa que pueda conectarse y comunicarse a través de internet.
- Minimizan el trabajo humano, ya que la automatización ayuda a la minimización de recursos humanos, y errores.
- Entregan acceso rápido. Ya que la salud de cultivos, y el suelo puede ser monitoreada de forma remota a través de cualquier dispositivo en cualquier región.
- Eficiencia en el tiempo. Ya que permiten la generación automática de informes y el monitoreo remoto ahorra tiempo al agricultor.
- Comunicación eficiente: gracias al uso de iOS y Android permite tener una gran plataforma de aplicaciones conectada con la comunidad de agricultores, estudiantes, y científicos que pueden compartir su trabajo y metodologías de cultivos.
- Análisis: permite realizar análisis de suelo, promedio de lluvia, variables que inciden en el desarrollo de los cultivos, entre otras (Puranik, Sharmila, Ranjan, & Kumari, 2019)

En ese contexto, en todo el mundo, se ha fomentado la integración del internet de las cosas consiguiendo un ahorro significativo de hasta el 30% en costos que están relacionados con la supervisión y recolección de productos, generando mejores usos de fertilizantes, agua y plaguicidas. También aplicaciones de software, drones,

supervisión remota y minería de datos son usadas dentro del IoT en la agroindustria, desembocando en productos de mejor calidad y cultivos por área más productivos.

En Estados Unidos algunas empresas como Monsanto, DuPont, John Deere y otras están invirtiendo en el aprovechamiento de los datos y herramientas y soluciones para el campo. Un estudio de 2021 realizado por el BID (Banco Interamericano de Desarrollo) sobre el panorama agro tecnológico en Latinoamérica concluía que la aplicación de IoT y otras tecnologías emergentes en los países del ALC (acuerdos de libre comercio) generaron aumentos de producción de entre 50% y 80% y la reducción de costos del 20% a 40% pero fueron poco masificados. (CEPAL, FAO & IICA, 2021).

En Colombia, el Gobierno Nacional ha invertido en la integración de tecnologías basadas en IoT, inteligencia artificial e industria 4.0 en el agro, con el objetivo de fortalecer este sector y entregar datos sobre los cultivos al agricultor que le permita, gracias al monitoreo, medición y control de variables, poder tomar las mejores decisiones sobre sus cultivos (MINTIC, 2019). Un caso importante de esto es el Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación Agroindustrial Colombiano PECTIA, donde el Gobierno Nacional a través de ministerio de agricultura ha venido trabajando la inyección de tecnologías e innovación que permitan aumentar la competitividad, la sostenibilidad y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población (MinAgricultura de Colombia, 2015).

El internet de las cosas ha potenciado una revolución dentro del sector agrícola en cuanto a técnicas y formas de cultivo alternativas a los cultivos en tierra que generan grandes beneficios. Dos de estas técnicas de cultivo alternativos más importantes son los hidropónicos y aeropónicos. A nivel mundial se estima que los

cultivos hidropónicos generan ingresos por 821 millones de dólares y un crecimiento de 4.5% entre 2011 y 2016 de acuerdo con un informe del IBIS World. (IBIS World, 2016)

Este tipo de cultivos se ha desarrollado fuertemente en el mundo actualmente y este auge se debe principalmente a sus innumerables ventajas y su innegable superioridad en producciones por metro cuadrado, calidad, ahorro, y eficiencia con respecto a cultivos en tierra, además de su necesaria dependencia de tecnologías de industria 4.0, como el internet de las cosas, lo que redundará en beneficios mayores para los productores, gracias al control, sensorización, y monitoreo del sistema.

Un ejemplo de esto está en Japón, donde empresas y universidades han estado apostando desde el año 2009 por técnicas de producción aeropónicas y gracias a esto el número de fábricas de plantas aeropónicas ha crecido de 50 en 2009 a más de 150 en 2013 (T.Liu, Janku, & Pietz, 2018). Ejemplos como este se repiten en países como Holanda, Israel, o Indonesia.

Por su parte en Colombia los cultivos aeropónicos e hidropónicos han tenido más dificultades para desarrollarse. Pese a que en la última década el mercado de éstos ha crecido en un 200% existen inconvenientes y desafíos por afrontar derivados de la falta de apoyo estatal y apoyos bancarios para su desarrollo ya que estos cultivos innegablemente requieren de una fuerte inversión económica. (Urrego, 2021)

Es en este contexto de auge y crecimiento de los cultivos aeropónicos e hidropónicos donde IoT ha cobrado gran fuerza. Ya que estos cultivos requieren necesariamente de tecnologías de control y monitoreo para poder desarrollarse de forma correcta y efectiva. Por lo tanto, se requiere de un análisis e investigación que permita encontrar los proyectos más relevantes de IoT implementados en cultivos

aeropónicos e hidropónicos tanto en Colombia como en el mundo con el fin de poder analizar sus tecnologías, protocolos, formas y métodos para determinar campos de acción donde se puedan fortalecer y mejorar.

De esta manera una sólida revisión y un posterior análisis del estado del arte de IoT aplicado a los cultivos aeropónicos e hidropónicos en el mundo y en Colombia, permite poder analizar los beneficios de IoT aplicados a estos cultivos, y determinar problemas sin resolver de investigación, los cuales se pueden proyectar como desafíos futuros con el fin de mejorar de forma importante la industria agrícola, y aportar de forma significativa al problema de la demanda alimenticia indicado en el planteamiento del problema.

4 MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

Para la realización del estado del arte se realiza un proceso de indagación, recolección, organización, análisis, e interpretación de la información encontrada en cada fuente bibliográfica consultada; cada una de ellas fueron electrónicas a través de bases de datos, revistas, y páginas web. Se realiza una revisión sistemática presentando el resumen de las evidencias y hallazgos de los investigadores en cada proyecto expuesto, discriminando entre la síntesis del mismo, conclusiones del autor, y campos futuros de investigación en el tema.

4.1 Búsqueda bibliográfica

Las bases de datos consultadas para la extracción de proyectos relevantes a este estado del arte fueron: IEE Explore, SCOPUS y otros motores de búsqueda como google académico. De toda la bibliografía consultada se seleccionan un total de veintiocho (28) artículos y libros académicos que abordan las temáticas detalladas en este documento y se realiza un rastreo de la bibliografía referenciada en estos artículos. Las fuentes consultadas pueden clasificarse en fuentes primarias (libros, artículos y tesis) y fuentes secundarias (bases de datos, y revisiones sistemáticas).

4.2 Estrategia de búsqueda

Las consultas realizadas tomaron como base las siguientes cadenas de búsqueda:

- Cadena de búsqueda: TITLE-ABS-KEY (IoT AND in AND agriculture).

Para encontrar información referente al IoT aplicado a la agricultura en general, en SCOPUS.

- Cadena de búsqueda: (TITLE-ABS-KEY(IoT in Aeroponic Systems)). Para hallar información relacionada con IoT en cultivos aeropónicos, en SCOPUS.

- Cadena de búsqueda: TITLE-ABS-KEY (biot AND ion AND hydroponic AND systems). Con la finalidad de encontrar información de cultivos aeropónicos aplicados a sistemas hidropónicos en SCOPUS.

- Cadena de búsqueda "All Metadata":IoT in agricultura. IoT aplicado a la agricultura en IEEE explore.

- Cadena de búsqueda "All Metadata":IoT in aeroponics systems. IoT aplicado a sistemas aeropónicos en IEEE explore.

- Cadena de búsqueda "All Metadata":IoT in hidroponycs systems. IoT aplicado a sistemas hidropónicos en IEEE explore.

4.3 Criterios de selección

Los criterios de selección se determinan por los objetivos planteados en esta revisión. Por lo tanto, fueron seleccionados todos los artículos, libros y medios web que apuntaban hacia la integración de tecnologías IoT enfocadas en cultivos aeropónicos e hidropónicos.

El primer criterio importante a tener en cuenta es el título del documento, el cual debe indicar claramente que el proyecto va enfocado hacia alguna tecnología IoT aplicada a cultivos ya sea aeropónicos o hidropónicos. Y el segundo criterio importante es el resumen del proyecto, revisando que esté acorde a lo requerido. Y el tercer y

último criterio es las fechas, tomando como base artículos desde el año 2006 hasta la actualidad.

Con lo anterior como contexto, se selecciona una muestra de 28 artículos de impacto nacional e internacional en los diferentes motores de búsqueda indicados anteriormente, que cumplen con estos criterios para la elaboración del estado del arte.

4.4 Organización de la información

La organización se estructura partiendo en primera instancia del problema, el cual se define y se detalla en base a la problemática del hambre en el mundo dada la disminución y falta de producción agrícola. Para llegar a esto se requiere consultas, e investigaciones de documentos al respecto y se plasma en el trabajo.

Posterior a esto se realiza la justificación del problema, consultando información para poder robustecerla, y luego comienza la revisión sistemática de artículos, y libros elaborando de esta manera el estado del arte de las diferentes tecnologías IoT aplicadas a los cultivos aeropónicos e hidropónicos en el plano nacional e internacional. Para finalizar se detallan los campos de investigación que se requieren fortalecer en esta temática, y se presentan las conclusiones.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Definiciones de IoT

Internet de las cosas o IoT habla de la conexión de los objetos tecnológicos a internet y este concepto indudablemente se deriva del avance de la tecnología y la necesidad que esto trae de compartir y controlar las cosas que nos rodean. (Parra, Guerrero, & Rico, IOT: una aproximación desde ciudad inteligente a universidad inteligente, 2017)

Por otro lado (Cruz, y otros, 2015) afirman que internet de las cosas es el componente tecnológico fundamental sobre el cual el paradigma de la industria 4.0 sienta sus bases.

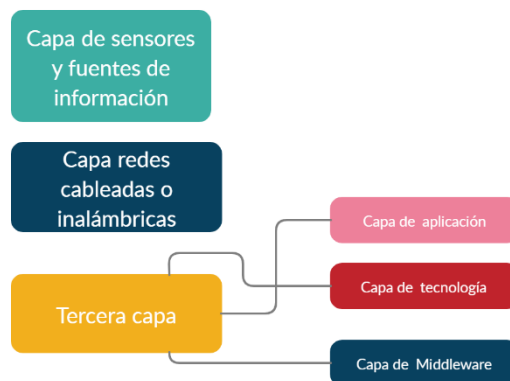
El término “IoT” como tal, fue acuñado en 2009 por el profesor de MIT Kevin Ashton, quien usó por primera vez la expresión “*internet of Things*” de forma pública. Desde entonces el uso de este término ha ido creciendo de forma exponencial. (Ashton, 2009)

IoT se presenta de forma fuerte en los campos de redes basadas en protocolo IP, economía basada en capacidad de cómputo, miniaturización, análisis de datos y computación de la nube. Además, también es usado en el sector de la salud, herramientas de aprendizaje, seguridad, optimización de procesos, agricultura, entre otros.

IoT tiene una arquitectura de tres niveles o capas. En el primer nivel se muestran diferentes sensores, y cada uno de ellos funge como una fuente de información. Diferentes tipos de sensores permiten captar diverso contenido e

información. El segundo nivel integra todo lo que son redes cableadas e inalámbricas para poder transferir información de las cosas con buena precisión. Y el último nivel, consta de tres subcapas: capa de tecnología, capa de middleware, y capa de aplicación; este nivel permite entregar toda la funcionalidad del sistema al usuario final (Parra, Guerrero, & Rico, 2017).

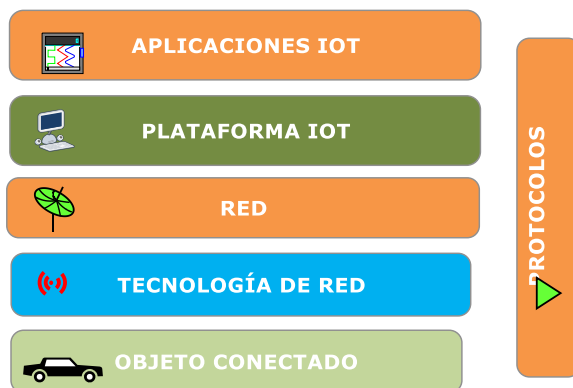
Figura 3.
Capas de IoT.



Así mismo el estudio de IoT se puede centrar en sus componentes o áreas fundamentales los cuales son: (Cruz, y otros, 2015)

- Cosas (objetos) conectados
- Tecnologías de red
- Protocolos de comunicación
- Plataforma IoT para el tratamiento de los datos
- Aplicaciones

Figura 4.
Componentes básicos de IoT.



Objetos conectados

A medida que surgen microprocesadores más baratos y de mayor capacidad, además de modelos de consumo más reducido en energía, provoca la aparición de soluciones muy optimizadas para la recolección, procesamiento y envío de datos. En las situaciones donde lo requiere el objeto puede estar dotado de cierta inteligencia, pero IoT no requiere que necesariamente sea así. En muchos casos este proceso se realiza en la nube, la plataforma IoT o en la misma aplicación, liberando al objeto para ser usado en lo mínimo requerido. (Cruz, y otros, 2015)

Conectividad IP

Para realizar una implementación IoT, una conectividad nativa IP sería lo mejor, ya que permitiría que el dispositivo interactúe sin hacer uso de otros dispositivos intermediarios. Pero las conectividades basadas en IP no siempre son sencillas de usar debido al coste del dispositivo, consumo energético, costo de la conectividad, etc. Por esto, para poder tener conectividad IP inalámbrica en un objeto, se requiere hacer uso de diferentes tecnologías, que pueden traer su pro y sus contras. En el siguiente cuadro se indican. (Cruz, y otros, 2015)

Tabla 1.
Comparación tecnologías para IoT.

| Tecnología | Ventajas | Desventajas |
|------------------------------------|---|---|
| Conectividad Wifi | Costo del dispositivo reducido | Alto consumo energético – No es muy óptimo para grandes volúmenes de dispositivos |
| Conectividad Celular (2G-3G-4G-5G) | Costo reducido en 2G. | Alto consumo energético – No es óptimo para altos volúmenes - Costo de conectividad a tener en cuenta |
| Tecnologías de radio | Actualmente se puede hacer uso de tecnologías como 6LowPAN, pero su uso aún es reducido | |

La elección de conectividad IP puede estar bien en algunos casos, pero cuando se necesita consumos reducidos y costos bajos, se puede recurrir a tecnologías como ZigBee. Cuando se requiere despliegue de una red propia o en el caso de protocolos específicos creados por el mercado IoT con redes y estándares se puede hacer uso de Sigfox, LoRa, Weighless, etc., que son conocidos como redes LPWA. (Bajo poder área amplia). (Cruz, y otros, 2015)

Para lograr desarrollar un proyecto de internet de las cosas se requiere una red de comunicaciones. Estas redes permiten la interconexión de dispositivos, máquinas, sensores y demás elementos, los cuales generan datos o información desde cualquier localización geográfica. Las redes de comunicación están formadas por diferentes tipos de medios tecnológicos que permiten la efectiva comunicación entre equipos que se encuentran a larga distancia.

Para que una red de comunicación IoT sea efectiva se requiere lo siguiente:

- *Baja tasa de datos*
- *Bajo consumo de energía*
- *Largo alcance en la comunicación*
- *Conexiones bidireccionales*

- *Movilidad y servicios de localización*

5.2 Comienzos de IoT

El origen de los objetos conectados tiene lugar en el siglo XIX, en lo que se conoce como el primer experimento de telemetría de la historia. Científicos franceses en 1874 instalaron dispositivos de información meteorológica y de profundidad de nieve en la cima del Mont Blanc. A través de un enlace de radio de onda corta, los datos se transmitían directamente a París. (Cruz, y otros, 2015)

Para 1926 Nikola Tesla en una entrevista a la revista Colliers anticipaba el crecimiento de la conectividad a nivel global y la tecnología miniaturizada. *“Cuando lo inalámbrico esté perfectamente desarrollado, el planeta entero se convertirá en un gran cerebro, que de hecho ya lo es, con todas las cosas siendo partículas de un todo real y rítmico...y los instrumentos que usaremos para ellos serán increíblemente sencillos comparados con nuestros teléfonos actuales. Un hombre podrá llevar uno en el bolsillo”*. (Kennedy, 1926)

También Alan Turing en 1950 publicaba un artículo en el Oxford Mind Journal donde anticipaba la necesidad futura de entregar inteligencia y capacidades de comunicación a sensores y dispositivos *“También podemos sostener que es mejor proporcionar la máquina con mejores sensores que el dinero pueda comprar y después enseñarla a entender y hablar inglés”*. (Turing, 1950)

Pero realmente las bases de IoT se establecen en las décadas de los 1960 y 1970 cuando se crearon los primeros protocolos de comunicaciones dentro de la red ARPANET en el departamento de defensa de EEUU; con lo cual se ponían los cimientos del actual INTERNET. Luego para la década de los 80's, la necesidad de

comunicaciones rápidas y de bajo costo, a medias y largas distancias generó la creación de redes distintas que no eran compatibles entre sí. Pero para los años 90's lo que hoy conocemos como internet comenzó su expansión. Todas las redes que antes funcionaban de forma incompatible entre sí, ahora se conectaron mediante el famoso protocolo TCP/IP, que es la base de internet. Con ello ARPANET se convirtió en INTERNET.

Ya con el surgimiento de internet, el poder conectar objetos empezó a hacerse popular. Para 1990 Romkey y Hackett, crean el primer aparato conectado a internet. Era una tostadora que se podía encender y apagar de forma remota. Para ello se hizo uso del protocolo TCP/IP y el control se realizó gracias a SNMP (simple network management protocol). (Bismart, 2019)

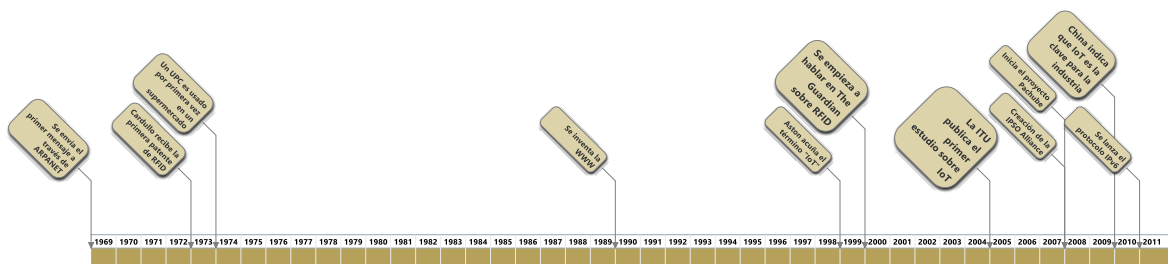
Pero a pesar de que internet ofrecía una gran revolución en las comunicaciones, en sus inicios las redes eran principalmente cableadas. Esto retrasó la idea de implementar objetos conectados y que pasaran inadvertidos durante años. No fue sino hasta inicios del siglo XXI cuando se experimentó un crecimiento en la cantidad de objetos conectados. Conceptos como WSN (redes inalámbricas de sensores) o M2M (máquina a máquina) empezaron a surgir y con ello IoT.

Para el año 2008 un grupo de empresas crearon la IPSO Alliance (protocolo de internet para objetos inteligentes). El objetivo de esta creación era desarrollar e invertir en el internet de las cosas, para ello hacer uso de los protocolos de internet en objetos inteligentes. Actualmente IPSO Alliance continúa activa y participan empresas tan importantes como Google, Motorola, Bosch o Toshiba. (Martínez, 2019)

Para 2010, el número de objetos físicos cotidianos y dispositivos conectados a internet era de alrededor de 12,5 mil millones. Para 2016 habían más de 25mil millones de dispositivos conectados a la internet. Para el 2020 se espera que más de 50mil millones de dispositivos estén conectados a internet. (Salazar & Silvestre, Internet de las cosas, 2016)

Figura 5.

Línea de tiempo. Evolución de IoT.



5.3 Dispositivos IoT

Con la aparición del internet de las cosas han surgido numerosos dispositivos que intercambian información entre sí, y con los usuarios por medio de internet o redes de comunicación. El objetivo es recopilar y procesar la información obtenida.

Las redes IOT hacen uso de dispositivos electrónicos que puedan detectar y recopilar variables externas tales como humedad, temperatura, energía, actividad y variables de tipo fisiológicas (presión arterial, frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno. Etc.). Luego y sin la intervención humana (de forma automática) estos dispositivos pueden ser capaces de emitir los datos recopilados a través de señales eléctricas para que puedan ser procesados. (Mora & Urrego, 2018)

Entre los dispositivos IoT usados encontramos:

Sensores

Es un elemento medidor que puede ser capaz de detectar algún parámetro físico y procesar esta información a través de una señal compatible con el sistema. Un sensor tiene un elemento activo que es conocido como transductor. Existen varios tipos de sensores en función de la magnitud física que aborden.

Actuadores

Es un dispositivo capaz de poder transformar energía hidráulica, neumática, o eléctrica en activación de procesos cuya finalidad es generar un efecto sobre un proceso automatizado. Se recibe la orden de un regulador o controlador y luego se activa un elemento final de control como por ejemplo una válvula. (Rodríguez & López, 2017)

5.4 Protocolos en IoT

En redes de sensores se usan diversos protocolos para regular las comunicaciones entre los dispositivos.

WiFi.

Se trata de una tecnología de interconexión inalámbrica, que hace referencia “fidelidad inalámbrica”. Wi-fi Alliance es una organización que certifica que los dispositivos WiFi cumplan con un conjunto de estándares IEEE inalámbricos 802.11. Este estándar nos permite definir los niveles inferiores de la capa del modelo OSI, la capa física, y la capa de enlace de datos para las conexiones inalámbricas que hacen uso de ondas electromagnéticas.

Este estándar cuenta con diversas variaciones que poseen características específicas para cada caso puntual, permitiendo modificar principalmente la frecuencia de trabajo y la velocidad de transferencia de los datos. En los dispositivos actuales, 802.11 b/g/n es el estándar más usado, y trabaja en la frecuencia de 2.4 GHz, alcanzando velocidades de hasta 300 Mbps. La topología red de WiFi se estructura en creación de puntos acceso en donde se

conectan los diferentes dispositivos que forman parte de la red. (Medina, Armando, & Tinetti, 2018)

LORAWAN

Es una red de área ancha inalámbrica de baja potencia (LPWAN) que se usa para la operación de dispositivos en una red local, nacional o mundial. LORAWAN se enfoca en requisitos de internet de las cosas como lo son bidireccionalidad, movilidad y localización. Esta red facilita la interoperabilidad entre dispositivos inteligentes sin necesidad de instalaciones complejas y permite que el usuario implemente de forma efectiva el internet de las cosas. (Rodríguez & López, 2017)

Estándar IEEE 802.15.4

Las redes de sensores inalámbricos se conforman por objetos que contienen sensores y transmisores de forma embebida, los cuales poseen la capacidad de monitorizar y poder generar cambios en el entorno en el cual se desenvuelven. Esto permite el control remoto y la monitorización además de entregar grandes oportunidades para poder realizar vigilancia y análisis de fuentes de datos con información constante. Esto permite un mejor manejo y búsqueda de los datos en tiempo real.

Es por esto que desde 2003 la IEEE ha sido el estándar más empleado en las redes de sensores inalámbricos. Ya que este estándar permite determinar las comunicaciones en las capas físicas y de control de acceso a medio MAC en las redes inalámbricas de sensores de área personal y baja velocidad LR WPAN. Estas poseen una baja tasa de datos en su transporte y un bajo consumo de energía para funcionar. (Cama, Hoz, & Cama, 2012)

Estándar 6LoWPAN

El estándar 6LoWPAN incluye todos los mecanismos necesarios para poder comprimir direcciones IPv6 sobre IEEE 802.15.4

5.5 Breve revisión de la industria 4.0.

El término industria 4.0 hace referencia a un nuevo modelo de organización y control de cadena de valor a través el ciclo de vida del producto y a lo largo de los sistemas de fabricación apoyados por las tecnologías de la información. Se trata de la aplicación a la industria del modelo de internet de las cosas.

De la primera a la tercera revolución industrial

En la primera revolución industrial entre los siglos XVIII y XIX los procesos de producción se mecanizaron y se logró transformar la economía agraria y artesanal en una nueva economía ahora liderada por la industria. La segunda revolución industrial por su parte trajo en el siglo XX la producción en serie con las fábricas y líneas de montaje que permitieron ahora crear productos para el gran consumo. Llegados a finales del siglo XX se trae una nueva transformación, ahora la electrónica y la informática forman parte de los procesos industriales que permiten automatizar las líneas de producción y las máquinas reemplazan a las personas en las tareas que requieren repetitividad. (Román, s.F)

Luego de dos décadas de grandes avances tecnológicos en cuanto a internet, se produce un cambio importantísimo en la economía y sociedad. La convergencia de las tecnologías está transformando internet (el modo tradicional de información y personas) ahora en IoT o internet de las cosas. Este nuevo panorama abre una gama de enormes posibilidad y oportunidades que está creando un impacto disruptivo basado en el aprovechamiento de la industria. (Román, s.F)

En este nuevo escenario las necesidades del cliente han cambiado. El mercado ahora se basa en la personalización y en crear nuevos productos además de servicios innovadores. La calidad es exigencia, y se está dispuesto a pagar más por la

experiencia y el servicio que por el producto como tal. Por esta razón se requiere añadir nuevos servicios, experiencia individualizada y capacidad de actualización. Esto implica añadir conectividad y mejoras en software a los productos. En resumen, esta cuarta revolución industrial se desarrolla debido al impacto disruptivo que genera las tecnologías digitales aplicadas en los modelos de negocio de la industria. (Román, s.F)

5.6 Tecnología LoRa

LoRa

LoRa es definido como una plataforma inalámbrica de largo alcance y de bajo consumo, que es la opción tecnológica predominante para la construcción de redes IoT en todo el mundo. Esta tecnología hace utiliza el espectro de frecuencia de uso público en la banda de los ISM (Wifi, y bluetooth) usando modulación de espectro ensanchado en la banda menor a 1GHz. Con lo cual se logran largos alcances con distancias de más de 10 kilómetros.

La tecnología LoRa ha logrado posicionarse como una de las tecnologías principales dentro de las LWPAN debido a sus carecterísticas. Como lo es la bidireccionalidad, la interoperabilidad entre sensores distintos y la facilidad que ofrece para despliegue de aplicaciones IoT.

Al hablar de LoRa debemos hablar de dos tipos de tecnologías: LoRa y LoRaWAN. La primera define la capa física desarrollada por la empresa Cyleo en 2010, y LoRaWAN es la especificación de red que propuso LoRa Alliance en 2015, ésta define la capa MAC basada en modulación LoRa. (Martínez, 2019)

Las aplicaciones de LoRa en IoT han mejorado la manera en que se abordan los desafíos y problemas a los que se enfrentan las ciudades y comunidades tales como cambios climáticos, control de contaminación, alertas tempranas de desastres naturales y salvar vidas. (Triana & Rodríguez, 2018)

Arquitectura LoRa

La estructura de LoRa se compone de tres partes:

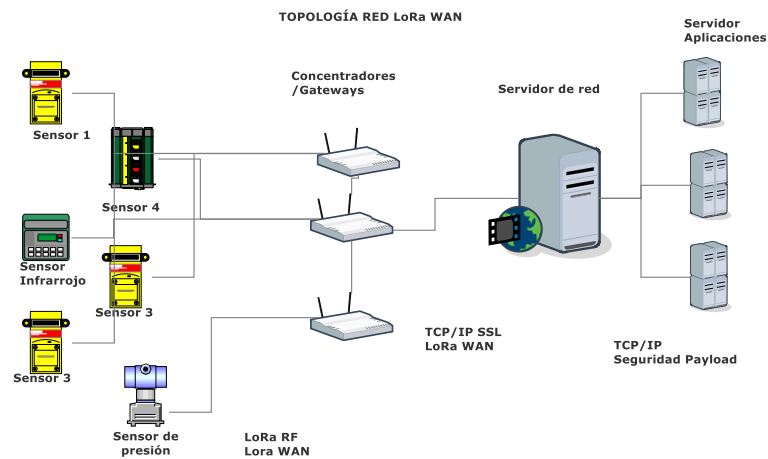
- a) Servidores de red. Encargados de centralizar y procesar la información.
- b) Estaciones base o concentradores.
- c) La infraestructura. Que son los nodos finales. Estos nodos permiten recolectar la información del entorno y transmitirla.

Los nodos y el concentrador forman una topología en estrella de un solo salto.

Como lo muestra la siguiente figura:

Figura 6.

Topología de una red LoRa WAN.



El grupo de dispositivos finales y concentradores pueden agruparse formando una conexión con la topología en estrella. Las transmisiones en este tipo de tecnología

no requieren de un reenvío y se pueden gestionar de forma fácil. Los concentradores pueden contarse a los servidores actuando en forma de puente generando un diseño muy sencillo.

En otros tipos de redes inalámbricas los nodos finales envían información para otros nodos e incrementan el rango de comunicación y el tamaño de la red. Pero a pesar del aumento de alcance, se añade mucha complejidad y reducción de capacidad de red y la vida de baterías.

Lora WAN permite evitar esto usando una arquitectura en estrella y logrando optimizar los recursos de los dispositivos para tener un mayor alcance en las comunicaciones. Los nodos no se asocian necesariamente con los concentradores, si no que pueden ser recibidos por varios concentradores a la vez. Cada uno de estos envía la información recibida al servidor de red por alguna tecnología adicional como lo es WiFi, redes móviles o comunicación satelital.

El cerebro de la red es el servidor, que se encarga de gestionar la misma y eliminar la redundancia a través del filtrado de paquetes recibidos, realizando verificaciones de seguridad y adaptaciones en la tasa de datos. Por otro lado, la comunicación entre nodos es de tipo asíncrona; de tal forma que los nodos envían información cuando ya está disponible. El método usado es conocido como "aloha". En una red de tipo malla o con comunicación síncrona los dispositivos deben sincronizarse con la red antes de poder recibir mensajes. Esto consume más energía y agota el tiempo de vida de la batería de los dispositivos. (Martínez, 2019)

Los factores importantes a tener en cuenta el momento de determinar una capacidad de red en LoRa son:

- Número de canales usados
- Longitud de la carga útil del paquete
- Frecuencia de transmisión de los distintos nodos
- La tasa de datos. Esta tasa varía según el factor SP de la

modulación. Como LoRa usa modulación ensanchada, cuando se usan varios factores de encachando para las señales, éstas permiten ser ortogonales entre sí. Por esto cuando este factor cambia, entonces lo hace también la tasa de datos. El concentrador puede recibir muchas señales en un mismo canal con distintas tasas de datos.

Canales y velocidades de transmisión

La comunicación entre nodos y el concentrador usa diferentes canales de frecuencia y datos. Por esto para que se pueda transmitir en cualquier canal que esté disponible en cualquier momento y a cualquier tasa de velocidad se requiere que se cumplan las siguientes características:

- El dispositivo emisor cambie de canal de forma aleatoria en cada transmisión. Esto hace que el canal sea más robusto y fuerte ante posibles interferencias.
- El nodo puede escoger el ciclo máximo de trabajo en la transmisión según la banda usada y la regulación local.

En la siguiente tabla podemos ver los parámetros para los canales según la regulación europea: (Martínez, 2019)

Tabla 2.*Canales y parámetros para Lora WAN.*

| Canal | Parámetro | Bandas de frecuencia | |
|-------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| | | 868 MHz | 433 MHz |
| 0 | Frecuencia | 868100 KHz | 433175 KHz |
| | Porcentaje de trabajo | 0.33% | 0.33% |
| | Tasa de datos | 0-5 | 0-5 |
| | Estado | On | On |
| 1 | Frecuencia | 868300 KHz | 433375 KHz |
| | Porcentaje de trabajo | 0.33% | 0.33% |
| | Tasa de datos | 0-5 | 0-5 |
| | Estado | On | On |
| 2 | Frecuencia | 868500 KHz | 433575 KHz |
| | Porcentaje de trabajo | 0.33% | 0.33% |
| | Tasa de datos | 0-5 | 0-5 |
| | Estado | On | On |
| 3-15 | Frecuencia | 868325 - 899750 KHz | 433050-434790 KHz |
| | Porcentaje de trabajo | * | * |
| | Tasa de datos | 0-5 | 0-7 |
| | Estado | Off | Off |

Nota: Adaptado de (Martínez, 2019)

Como es posible observar, los canales 3-15 están en Off. Al activarlos se configurar adaptando el ciclo de trabajo de los demás canales, de tal forma que no se sobrepase el 1% del máximo permitido en las frecuencias. La siguiente tabla toma como base la anterior para describir la tasa de datos:

Tabla 3.*Configuración y tasas de datos en LoRa WAN.*

| Tasa de datos | Configuración | Tasa de bits |
|---------------|-----------------------|--------------|
| 0 | LoRa: SF12/125 KHz | 250 bps |
| 1 | LoRa: SF11/125 KHz | 440 bps |

| | | |
|---|----------------------|-----------|
| 2 | LoRa: S10/125 KHz | 980 bps |
| 3 | LoRa: SF9/125 KHz | 1760 bps |
| 4 | LoRa: SF8/125 KHz | 3125 bps |
| 5 | LoRa: SF7/125 KHz | 5470 bps |
| 6 | LoRa: SF7/125 KHz | 11000 bps |
| 7 | FSK: 500 kbps | 50000 bps |

Nota: Adaptado de (Martínez, 2019)

Dispositivos en IoT

En una red tipo LoRaWAN los dispositivos se dividen en tres clases según su función soportada. Estas tres clases pueden coexistir en una misma red y los dispositivos pueden variar su clase al modificar su configuración.

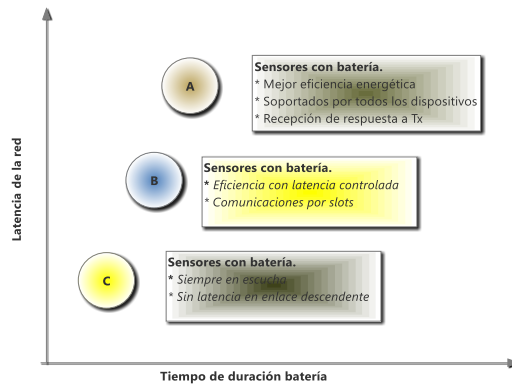
Tenemos así:

- *Dispositivos clase A.* Dispositivos bidireccionales que permiten la transmisión de datos. Por esta razón luego de cada transmisión de datos ascendente por parte de un dispositivo, siempre emergen dos ventanas de recepción que permiten recibir una respuesta descendente.
- *Dispositivos clase B.* Estos dispositivos pueden crear ventanas de recepción sin necesidad de que exista una transmisión, aumentando de esta forma la capacidad de poder recibir datos por parte del dispositivo.
- *Dispositivos clase C.* Se mantienen constantes en estado de recepción, y sólo se interrumpen en caso de una transmisión. Este modo de funcionamiento demanda gran cantidad de energía. (Martínez, 2019)

La siguiente figura nos ilustra las clases de dispositivos en LoRa WAN

Figura 7.

Clases de dispositivos en LoRa WAN.



Modulación LoRa

LoRa opera en la banda ISM a una frecuencia por debajo de 1GHz. Es una banda libre que puede usarse sin licenciamiento. La modulación usada por LoRa es una variación de la modulación DSSS. Esta modulación permite crear conexiones a bajo costo y bajo consumo. Aproximadamente a 25mA en transmisión y 10 mA en recepción; además de ser robusto ante interferencias. Estas modulaciones permiten transmitir un mayor ancho de banda y tener un mejor sistema. Pero por otro lado la decodificación de la señal es más complicada.

LoRa nos permite realizar ajustes en la transferencia y potencia de transmisión. El mecanismo ADR (tasa de datos para adaptación) permite que los dispositivos ajusten parámetros en función del tamaño del mensaje que se transmite y la distancia, logrando una eficiencia y velocidad superiores. LoRa permite escoger entre seis factores de ensanchamiento en su modulación (SF o spreading factor). Cada uno de estos factores permite definir la relación entre potencia y tasa de transferencia. Entre más grande sea el valor del SF mejor será la sensibilidad del receptor y por ende la distancia del enlace. (Martínez, 2019)

Canales y rangos de frecuencia para LoRa

LoRa permite trabajar en diferentes rangos de frecuencia. Esto depende de la regulación en cada región del mundo. La siguiente tabla define especifica los canales y rangos de frecuencia en algunas regiones.

Tabla 4.

Canales y frecuencias de trabajo LoRa en algunas regiones del mundo.

| País o región | Ancho de banda | Cantidad de canales | Rango de frecuencias |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Europa | 0,3 MHz por canal | 8 canales | 863-870 MHz |
| Estados Unidos | Ancho de banda de 2,16 MHz por canal | 13 canales | 902-928 MHz |
| Canadá | | | |
| Australia | | | |
| Singapur | | | |
| Israel | | | |

5.7 Definición e historia de la Hidroponía

El cultivo bajo la modalidad de hidroponía es una técnica que permite el cultivo sin suelo, produciendo plantas principalmente tipo herbáceas aprovechando sitios o áreas no comunes, como azoteas, suelos infértiles, terrenos escabrosos, etc. En los cultivos hidropónicos los elementos minerales son aportados por la solución nutritiva, y el rendimiento de estos cultivos suele superar en el doble a lo producido en tierra. (Gimenez & José, S.F).

Entre las ventajas más importantes de los cultivos hidropónicos encontramos: mayor eficiencia del uso del agua, apropiada para uso de espacios pequeños como techos terrazas o paredes, obtención de mayor cantidad de plantas por metro cuadrado, menor número de horas de trabajo, no requiere rotación de cultivos ya que no existe suelo, y reducción de aplicación de agroquímicos. Respecto a las desventajas más importantes encontramos que existe un elevado costo inicial por las inversiones que debe realizarse acorde al sistema elegido y que se requiere

conocimiento especializado de la especie que se va a sembrar. (Forero, Parra, Luna, & Rivera, 2011)

Existen varios métodos de cultivo hidropónico que pueden elegirse en función de la disponibilidad de sustratos, recurso hídrico, costos, y especies que se siembren. Por lo tanto, se deben desarrollar estos sistemas basados en una evaluación frente a cada circunstancia teniendo en cuenta: costos, calidad de recursos, disponibilidad y abundancia. (Sholto, 1987). Teniendo en cuenta lo anterior, existen dos métodos de cultivo hidropónico principales:

- *Métodos cerrados.* En los cuales la solución nutritiva circula por todo el cultivo, y luego se almacena para volver a ser reutilizado. En este caso es importante revisar la solución nutritiva y debe ser estudiada muy a detalle además de reponer el agua y los nutrientes que la planta consume. (Urrestarazu, 2004).

- *Método abierto.* Donde la solución nutritiva es la adecuada y no recircula ni se reutiliza ya que el drenaje es mínimo. (Rosas, 2009)

Para que un sistema hidropónico pueda funcionar requiere de ciertos componentes fundamentales:

- *Planta.* Inicia con la semilla, que debe pasar por un proceso de germinación produciendo plántulas que tienen raíz, tallo y hojas y son trasplantadas al cultivo hidropónico. Es importante entender que para cada tipo diferente de planta se requerirán condiciones específicas de luz, aire y agua. (Rosas, 2009)

- *Sustratos*. El sustrato hace referencia a todos los materiales ya sean naturales o sintéticos, minerales u orgánicos, que sean puros o mezclados. (Hernández, 1987). Cuando cultivamos en hidroponía se tiene que prestar especial atención al material que se usa para reemplazar al suelo; este material debe servir como soporte y medio para transportar agua, nutrientes, y oxígeno, además de permitir el desarrollo radicular lo que es fundamental para que el crecimiento de la planta. (Resh, 1998). A su vez es importante entender que un sustrato en hidroponía debe tener varias características importantes (Hernández, 1987).:

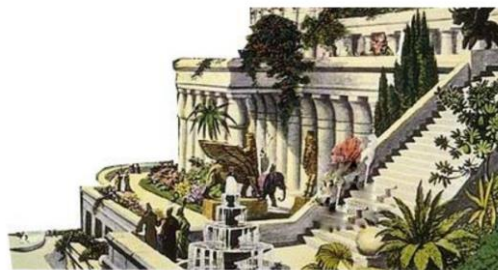
- Ser liviano. Ya que el peso es vital en la calidad del montaje.
- Debe retener humedad. Si el sustrato retiene humedad en forma adecuada y homogénea influye en las funciones metabólicas de la planta.
- Permitir buena aireación. En cultivos hidropónicos un componente fundamental es la buena absorción del oxígeno a través de las raíces; por lo tanto, hay que suministrárselo correctamente a través del sustrato. El oxígeno junto con un adecuado espacio para el desarrollo radicular, son fundamentales para la producción.
- Debe ser inerte químicamente. Hay que cuidar la composición del sustrato ya que la precisión es un aspecto clave en el suministro de nutrientes en cultivos hidropónicos. Por ello no se debe permitir que el sustrato reaccione con los nutrientes generando problemas en la nutrición y por lo tanto en el desarrollo de la planta.

- Debe estar disponible y ser de bajo costo. Esto es importante ya que el factor costo juega un papel importante en el tipo de sustrato a usar. Hay que verificar también la disponibilidad del mismo dentro de la región donde se implemente el cultivo.

El cultivo de plantas en medio acuoso es muy antiguo, se cree que el primer ejemplo de este tipo de este cultivo inicia en la antigua Babilonia con los famosos jardines colgantes que son una de las siete maravillas del mundo antiguo; respecto a estos jardines, el geógrafo griego Estrabón escribió: *“constan de terrazas abovedadas ahuecadas y llenas de tierra para permitir el cultivo de plantas de gran tamaño, alzadas unas sobre otras, que descansan sobre pilares cúbicos. Los pilares, las bóvedas, y las terrazas están construidas con ladrillo cocido”* (Gimenez & José, S.F), en lo que fue los primeros intentos exitosos de cultivo sin tierra.

Figura 8.

Representación de los jardines colgantes.



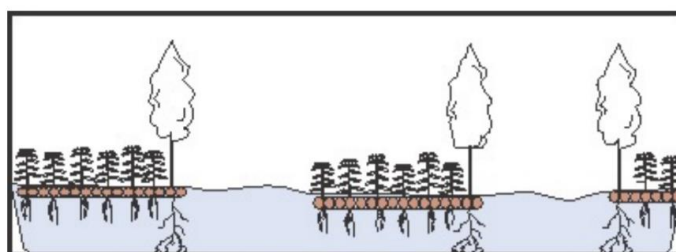
Nota: Adaptado de: (Gimenez & José, S.F)

Otras referencias indican que fueron los aztecas quienes introdujeron la agricultura hidropónica a través de los denominados jardines flotantes. Estos se construyeron debido a que sus vecinos más poderosos le negaban el acceso a tierra cultivable, por lo tanto, ellos dragaban tierra del fondo del lago Tenochtitlán, y la ponían

en balsas, luego estas balsas eran atravesadas con estacones de sauce, para que las raíces crecieran en tierra firme pero ancladas al fondo. Por lo tanto, esta tierra era rica en restos orgánicos y nutrientes sobre los que se cultivaban flores y verduras. Estas balsas eran llamadas Chinampas fueron descritas por el historiador William Prescott en sus crónicas de la destrucción del imperio azteca como "*Asombrosas Islas de Verduras, que se mueven como las balsas sobre el agua*" (Gimenez & José, S.F)

Figura 9.

Representación de los jardines flotantes



Nota: Adaptado de (Gimenez & José, S.F)}

Los chinos empezaron a hacer uso de técnicas de cultivo hidropónico desde hace miles de años con sus arrozales en terrazas lo que Marco Polo describió como "*huertas de agua*" (GroHo, 2020). La referencia más moderna que tenemos del cultivos hidropónicos surge en 1936 a través del doctor W.F.Gericke quien en la universidad de California comienza a popularizar la idea de que las plantas se podían cultivar en una solución de nutrientes y agua en lugar de tierra, cultivando tomates. Los resultados exitosos e impactantes de Gericke impulsaron la investigación adicional en campo gracias a los beneficios encontrados con los cultivos de plantas sin suelo, y este tipo de cultivos pasó a denominarse hidroponía. A partir de entonces empezaron a surgir cultivos hidropónicos a gran escala que fueron poco a poco extendiéndose por

Estados Unidos, Europa, Japón, India, México, Puerto Rico, entre otros. (Salazar G. , 2001)

Ya en la década de 1940, investigadores de la Universidad de Purdue desarrollaron un método hidropónico que empleaba área gruesa y graba como sustrato al que se le inundaba con una solución nutriente y se le drenaba para permitir la respiración de las raíces y desarrollo de las plantas. (Beltrano & Daniel, 2015) Durante la segunda guerra mundial, algunas islas del Pacífico usadas como bases militares hicieron uso de sistemas hidropónicos para alimentar a las tropas. Estos sistemas usaban el agua salada y como un medio sin suelo. (GroHo, 2020).

A partir de 1950 los cultivos hidropónicos se extendieron por el mundo y se volvieron fundamentales para poder cultivar en áreas donde la agricultura tradicional no puede hacerlo como zonas desérticas, contaminadas, con poco acceso a recurso hídrico, entre otras. Ya para entonces se encontraban bastante desarrollados en varios países del mundo como Japón, Holanda, Francia, Inglaterra, Nueva Zelanda, Australia, Alemania, Italia, Suecia, España, Rusia, Sudáfrica, e Israel. (Salazar G. , 2001)

En Colombia la hidroponía tuvo un fuerte desarrollo a partir del año 1986, gracias al respaldo que las Naciones Unidas dieron a esta técnica de cultivo bajo el programa de PNUD (programa de Naciones Unidas para el Desarrollo). Esto generó el surgimiento de la hidroponía social o popular que se refiere un conjunto de conocimientos y desarrollos científicos que se han estructurado en un lenguaje sencillo y de fácil comprensión con el fin de que cualquier persona que desconozca de la técnica pueda iniciar un cultivo aeropónico en su vivienda o en sus alrededores cultivando sobre todo hortalizas, verduras y flores de corte, que le garantizan seguridad

alimentaria y generación de ingresos económicos crecientes siempre que cultive un tamaño mayor a 20 metros cuadrados. (Salazar G. , 2001)

En 1988 surge APROHIJE (asociación de hidrocultivadores de Jerusalén) en Bogotá, conformada por más de 100 familias con cultivos hidropónicos en sus viviendas y que para el año 2000 ya empezaban a comercializar sus productos regados por agua limpia y cultivados sin pesticidas ni plaguicidas. Este proyecto aceleró el desarrollo de la hidroponía popular, permitiendo su ampliación a otros países del continente como República Dominicana, Haití, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, México, Panamá, Venezuela, Perú, Ecuador, Bolivia, Argentina, Chile, Brasil, Uruguay y Paraguay, así como otras regiones de África y Asia que incorporaron esta técnica de cultivo gracias al apoyo del PNUD y la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) que la promocionó como una eco tecnología con capacidad para organización de procesos comunitarios, y producción rápida de alimentos a bajo coste. (Salazar G. , 2001)

A partir de entonces la hidroponía se ha extendido en Colombia siendo una técnica de cultivo habitual. En 2009 en la Guajira se implementaron sistemas hidropónicos en el marco de la aplicación de políticas alimentarias y nutricionales para el desarrollo del departamento. (Cotes & Jiménez, 2009). Para aquel entonces en Bogotá un proyecto de cultivos hidropónicos auspiciado por la Alcaldía y el Jardín Botánico *José Celestino Mutis* con el fin de contribuir a la sostenibilidad ambiental, construcción de tejido social, y superación de pobreza que afecta a muchas personas en el distrito capital.

5.8 Definición e historia de la Aeroponía

La aeroponía es un sistema de cultivo en entorno de aire/niebla sin el uso de suelo. Es definido por la Sociedad Internacional para la cultura sin tierra como: *un sistema donde las raíces están expuestas, de forma continua o discontinua en un ambiente saturado de finas gotas de solución nutritiva*. Al ser un cultivo sin suelo se hace un menor uso de fertilizantes, menor consumo de recurso hídrico, mayor sanidad, mayor número de plantas por área, y mayor desarrollo del cultivo en corto tiempo. (Camelo, Tapias, & Carvajal, 2019).

Si bien la aeroponía se considera una técnica de cultivo moderno, lo cierto es que se ha intentado cultivar plantas en recipientes o contenedores a lo largo del tiempo. Las pinturas murales que se encontraron en el templo de *Deir el-Bahari* (1480-1458 a.c) parecen ser el primer caso documentado de plantas cultivadas en recipientes sobre el suelo (Naville, 1913). Investigaciones recientes han descubierto que culturas tan antiguas como los babilonios o aztecas ya usaban técnicas de cultivo en las cuales los nutrientes se obtenían de fuentes distintas al suelo. (Lakkireddy, Kasturi, & Sambasiva Rao, 2012)

El primer cultivo en un ambiente controlado se remonta al siglo I, durante el reinado del emperador Romano Tiberio I; quien poseía cultivos de pepinos fuera de temporada, en piedra transparente o mica. Durante los siguientes 1500 años se harían muy pocos avances en cultivos sin tierra (Hoagland & Arnon, 1938). No es sino hasta el siglo XVII cuando empiezan a aparecer invernaderos de cultivos sin tierra en Francia e Inglaterra. Uno de estos cultivos fue desarrollado por el profesor Woodward en 1699, experimentando con plantas de menta cultivadas sin suelo. Más adelante, en Alemania

1860 *Sachs & Knop* desarrollan un cultivo que crece en una solución nutritiva llamada *nutricultura*. (Gericke, 1940)

Posterior a esto, a comienzos de siglo XX, botánicos encuentran en la aeroponía una herramienta de investigación en la fisiología de la raíz y empiezan a aplicar técnicas de aeroponía en cultivos. (Barker, 1922).

El primer sistema moderno aeropónico fue desarrollado en 1928 por el doctor Franco Massatini de la universidad de Pía, quien creó lo que se conoce como “columnas de cultivos”; éstas consisten en un cilindro de PVC u otros materiales puestos de forma vertical y con perforaciones en las paredes laterales donde se insertan las plantas al momento del trasplante. Las raíces crecen en oscuridad y pasan la mayor parte del tiempo expuestas al aire. (Rojas, 2018)

En esta misma época y a principios de 1940 *Carter (1942)* desarrolla un cultivo de plantas en vapor de agua, para de esta forma poder facilitar la evaluación de las raíces de las plantas. Luego, en 1944, *L.J Klotz* investiga sobre plantas de cítricos empañadas por vapor de agua en una investigación derivada de sus estudios sobre enfermedades en raíces y cítricos. (Gopinath, Vethamoni, & Gomathi, 2017) Trece años después *Went (1957)* realiza un estudio de cultivos en aire haciendo uso de la aspersion el cual se denominó aeroponía (Mbiyu, y otros, 2012).

En 1983 la compañía GTi crea el primer aparato aeropónico comercializable conocido como *Genesis machine*, el cual posteriormente se comercializó con el nombre de *sistema de enraizamiento Genesis*. (Lakkireddy, Kasturi, & Sambasiva Rao, 2012) El dispositivo de GTi era controlado por un microchip y poseía un spray de hidronutrientes atomizados de alta presión dentro de una cámara aeropónica; además tenía

conexiones a una toma eléctrica y a una llave de agua. (Gopinath, Vethamoni, & Gomathi, 2017)

A finales de 1980 Richard Stoner II, presidente y fundador de *Agrihouse* comienza a utilizar la aeroponía para cultivar hierbas en un invernadero usando su propio sistema aeropónico patentado; para aquel entonces Stoner era una de las únicas personas que empleaba la técnica de propagación de plantas aeropónicas en Estados Unidos. (SPINOFF, 2006)

Para 1996 ya se reportaban con éxito los sistemas de cultivos aeropónicos en Corea para la producción de tubérculos de semilla de papa. (Kang, Kim, Om, & Kim, 1996). En 1997 *AgriHouse* se une a la NASA para diseñar un experimento de plantas sin suelo el cual se desarrollaría en microgravedad a bordo de la estación espacial *MIR*; este experimento evaluó la efectividad de una solución no pesticida en las respuestas inmunitarias en plántulas de frijol *adzuki* obteniendo resultados que demostraron ser mucho más efectivos que sus ejemplares en la tierra. (SPINOFF, 2006)

Luego del gran éxito con su experimento a bordo del *MIR*, *AgriHouse* desarrolla la comercialización del sistema *aeropónico Genesis Series V*, el cual permite un rápido crecimiento de las plantas gracias a un ambiente limpio y estéril que impide la propagación de enfermedades e infecciones. Cada cámara de cultivo posee 161 aberturas, y las plantas no se estiran ni se marchitan mientras se desarrollan las raíces. El sistema *Genesis Series V* permite cultivar varios tipos de plantas tanto vegetales como frutales, de interior y de vivero. Los cultivadores de este sistema han reportado

seis ciclos de cultivos por año en lugar de uno o dos ciclos en la forma tradicional.
(SPINOFF, 2006)

AgriHouse indica que se puede reducir el consumo de agua en un 98%, el uso de fertilizantes en un 60%, pesticidas en un 100% y maximizar los rendimientos de los cultivos en porcentajes que van del 45 al 75%. Además, los resultados de la SBIR (sistema aeropónico cerrado de alto rendimiento e insensible a la gravedad para la producción de alimentos en el espacio) y la NASA demostraron que la tecnología aeropónica aumenta en un 80% la biomasa de peso seco por metro cuadrado en comparación con las técnicas de cultivos tradicionales basadas en el suelo. (SPINOFF, 2006)

Para el año 2006 la aeroponía ya era una técnica usada ampliamente alrededor del mundo. *Farran y Mingo (2006)* reportaron un rendimiento mínimo de 800 tubérculos /m² a una densidad de 60 plantas /m² durante un período de cinco meses con cosechas semanales; esto se traduce en una tasa de multiplicación de 1:13. (Farran & Mingo-castel, 2006).

5.9 Arquitectura Tecnológica del IoT

Existen varias propuestas de arquitecturas IoT aplicadas a la agricultura inteligente. En este apartado se estudiarán las más importantes.

Arquitectura Lambda

Existe la arquitectura de referencia estándar conocida como la arquitectura Lambda. Ésta se soporta en cuatro componentes importantes: captura de datos, capa de velocidad o procesamiento, capa de almacenamiento o seguridad, y la capa de consulta. La capa de captura de datos es la encargada del ingreso de la información.

Po su parte la capa de velocidad o procesamiento atiende las solicitudes que tienen requisitos de baja latencia haciendo uso de algoritmos rápidos o incrementales. La capa de almacenamiento soporta toda la gestión de los datos realizando un histórico de estos. Y por último está la capa de consulta donde se representa toda la información ya sea obtenida en tiempo real o almacenada.

Arquitectura soportada en IoT

Por otro lado, encontramos la arquitectura soportada en IoT la cual se representa mediante tres vistas importantes: negocio, funcional e implementación.

Figura 10.

Vistas de la arquitectura IoT



Nota: Adaptado de (Quiroga, Jaramillo, Campo, & Chanchí, 2017)

En la vista de negocio se presenta la arquitectura IoT que se ha propuesto desde las cuatro capas en la arquitectura Lambda. En la capa de captura se encuentran todo lo que son sensores, módulos de adquisición de datos, sistemas embebidos, microcontroladores, entre otros. En la capa de almacenamiento encontramos plataformas, servidores, y bases de datos que nos permiten el almacenamiento de los datos obtenidos en la etapa de captura. En la capa de procesamiento los datos se extraen con el fin de realizar análisis y obtener información para ser aplicada a los

cultivos. Por último está la capa de consulta, donde el agricultor puede visualizar la información en tiempo real y el comportamiento de las variables del cultivo con lo cual le sería posible tomar decisiones acorde a las necesidades del cultivo. (Quiroga, Jaramillo, Campo, & Chanchí, 2017)

Figura 11.

Vista de negocio en la arquitectura soportada en IoT

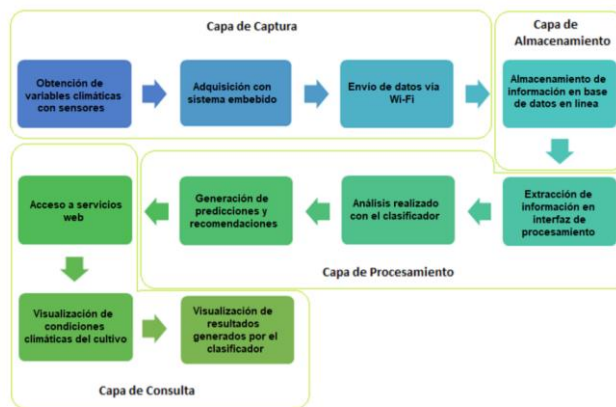


Nota: adaptado de (Quiroga, Jaramillo, Campo, & Chanchí, 2017)

También tenemos la vista funcional, que también está soportada en la arquitectura Lambda. De esta manera en la capa de captura se realiza la adquisición de las variables a través de sensores y el sistema embebido. Luego está la capa de almacenamiento que recibe los datos y los almacena en línea para que la capa de procesamiento analice los datos por medio de minería de datos. Y finalmente encontramos la capa de consulta que realiza todo el monitoreo del cultivo y su visualización. (Quiroga, Jaramillo, Campo, & Chanchí, 2017)

Figura 12

Diagrama de vista funcional en IoT.

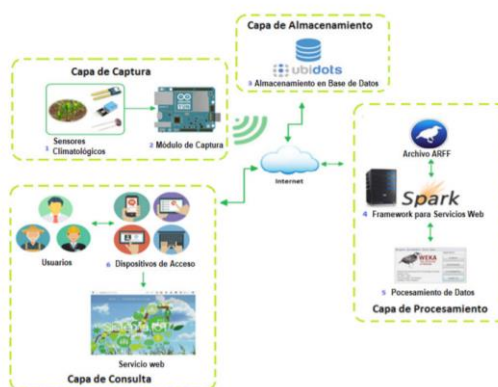


Nota: Adaptado de (Quiroga, Jaramillo, Campo, & Chanchí, 2017)

Por último, encontramos la vista de implementación donde se presentan a cabalidad los componentes de hardware y software escogidos para la implementación de la propuesta arquitectónica basada en Lambda. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de una arquitectura soportada en IoT:

Figura 13.

Arquitectura soportada en IoT



Nota: Adaptado de (Quiroga, Jaramillo, Campo, & Chanchí, 2017)

Como podemos observar esta arquitectura de ejemplo hace uso de tecnologías Arduino Yún, y sensores de temperatura, luz y humedad, para la capa de captura. Usa

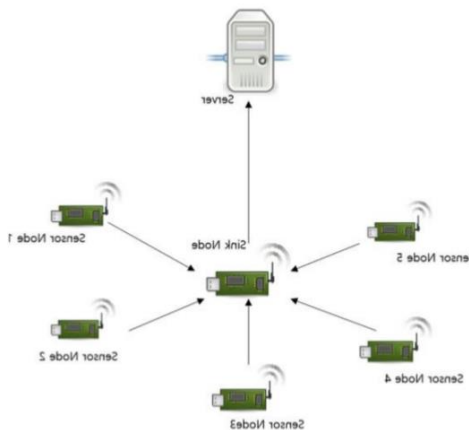
la base de datos ubidots para el almacenamiento, y los frameworks Spark y Weka para el procesamiento.

Arquitectura en Sensores WSN (Sivamani, Bae, & Cho, 2013)

En esta arquitectura de Sensores WSN, (Sivamani, Bae, & Cho, 2013) proponen una red de comunicación de sensores WSN compuesto por varios sensores nodos, conectados a un sensor principal o central conocido como nodo Sink, el cual se conecta de forma directa al servidor como podemos observar en la siguiente figura:

Figura 14

Red WSN propuesta por (Sivamani, Bae, & Cho, 2013)



Nota: adaptado de (Sivamani, Bae, & Cho, 2013)

En esta arquitectura existen varios puntos importantes para entender cómo funciona:

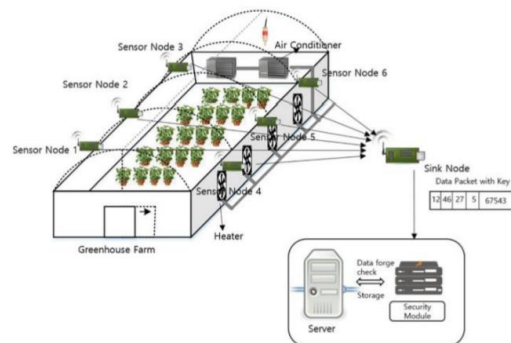
1. Los datos que detecta el sensor, tales como temperatura, humedad, o luz se envían al sink a través de comunicación inalámbrica.
2. Los valores se almacenan en la base de datos

3. Los valores se envían a los actuadores mediante protocolos de comunicación cableados.
4. El PLC decide la acción luego de analizar los datos
5. Se realiza la acción de control que permita mantener el sistema en óptimas condiciones.

Para lograr una arquitectura más segura se incluye un módulo de seguridad, así como actuadores, aire acondicionado y calentadores. La siguiente figura nos muestra un ejemplo de esta arquitectura.

Figura 15

Modelo de invernadero inteligente



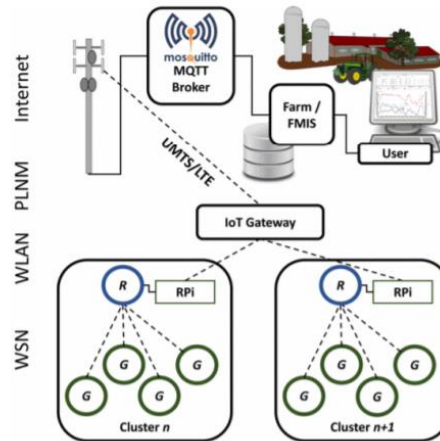
Nota: Adaptado de (Sivamani, Bae, & Cho, 2013)

Arquitectura Middleware con Mosquitto (Bauer & Aschenbruck, 2018)

Esta arquitectura se basa en el uso de Mosquitto. Se trata de sensores agrupados a nivel del suelo y con sus motores de referencia conectados a un sistema Raspberry Pi. Mediante PLMN se integran en la arquitectura IoT basada en MQTT lo que permite que la información en el sitio esté siempre disponible.

Figura 16

Arquitectura propuesta por (Bauer & Aschenbruck, 2018)



Nota: adaptado de (Bauer & Aschenbruck, 2018)

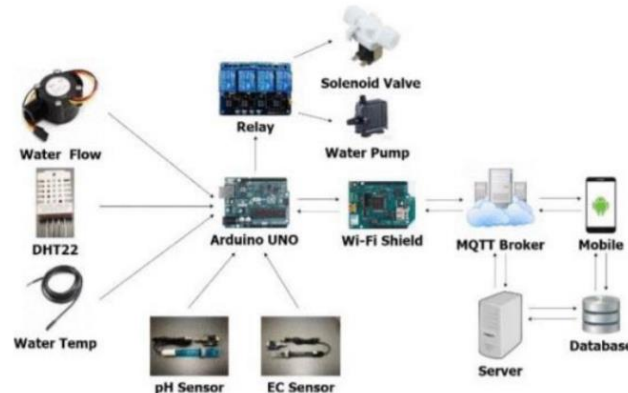
Los componentes de hardware usados son un prototipo de sensor compatible con el estándar IEEE 802.15.4 y de bajo costo construido por los autores para temperatura, humedad, y luz, también un raspberry Pi y un TelosB.

Arquitectura de Ruengittinun (Ruengittinun, Phongsamsuan, & Sureeratanakorn, 2017)

En esta arquitectura se propone un sistema IoT similar a los demás pero incluyendo un sensor de pH y otro de conductividad eléctrica. Se automatiza mediante una bomba de agua, una válvula, y un solenoide para mantener el equilibrio de la humedad, pH, y la conductividad eléctrica.

Figura 17

Arquitectura propuesta por (Ruengittinun, Phongsamsuan, & Sureeratanakorn, 2017)



Nota: Adaptado de (Ruengittinun, Phongsamsuan, & Sureeratanakorn, 2017)

Otras arquitecturas

Existen otras arquitecturas basadas en capas. La capa de percepción define los componentes de hardware y software asociados a la tecnología IoT implementada. (A. J, y otros, 2016) e incluye elementos como sensores, actuadores, transceptores, sistemas embebidos, tecnologías en radiofrecuencia, y demás elementos de monitoreo. (Tzounis, Katsoulas, Bartzanas, & Kittas, 2017). Por su parte, la capa de red es la que integra todos los elementos que permiten la transmisión de información que viene de la capa de percepción e involucra los diferentes elementos de comunicación que se aplican mediante las redes y sensores. (Cambra, Sendra, Lloret, & Garcia, 2017). Y por último está la capa de aplicación donde se implementan todos los desarrollos IoT mediante sistemas expertos que involucran toma de decisiones en los cultivos.

6. REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE DE IOT APLICADO A HIDROPONÍA Y AEROPONÍA A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

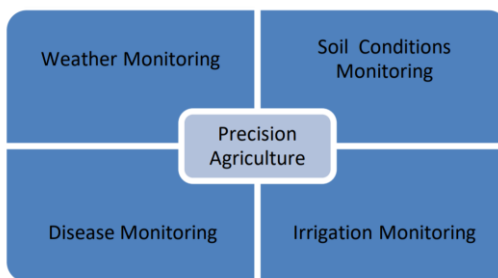
6.1 Introducción

En un artículo publicado en el congreso de la IEEE sobre sistemas abiertos del año 2020, el investigador malayo Mohamed Rawidean Mohd Kassim, resaltaba que el desarrollo de la agricultura es cada vez menor a que las generaciones más jóvenes prefieren migrar a las ciudades y el campesinado se está envejeciendo, por tal razón Kassim aboga por la imperante necesidad de automatizar los procesos en la agricultura para satisfacer los problemas de demanda de alimentos y en este artículo destaca algunas tendencias importantes en aplicaciones agrícolas de IoT, así como problemas y desafíos que se hacen mención en esta sección de este trabajo y que luego se verán reflejados a lo largo de la revisión a nivel internacional y nacional. (Kassim M. , 2020)

6.2 Campos de aplicación de IoT en agricultura de precisión

Figura 18

Campos de aplicación de IoT en agricultura de precisión



Nota: Adaptado de (Kassim M. , 2020)

El campo de aplicación de IoT en agricultura de precisión consta de cuatro componentes fundamentales:

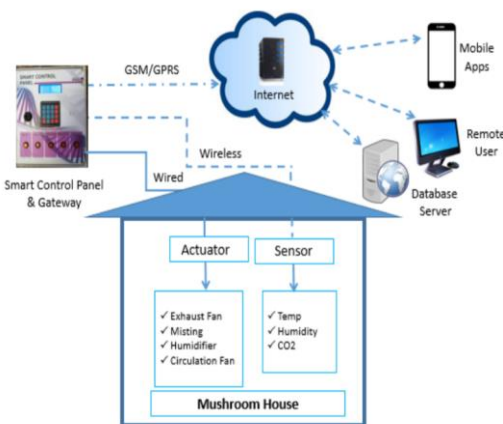
- **Monitoreo del clima.** Los parámetros climáticos impactan fuertemente en el crecimiento y desarrollo de la planta ya que aquí afectan variables tan importantes como temperatura, humedad, viento, presión del aire entre otros. Los datos de estas variables se recopilan mediante sensores cableados o inalámbricos y se transmiten a servidores en la nube. Todos estos datos mapean las condiciones climáticas y a través de herramientas de análisis de datos se puede determinar acciones de mejora para el cultivo.
- **Condiciones del suelo,** el monitoreo del suelo es uno de los campos más complicados para IoT aplicado a la agricultura de precisión. Aquí se monitorean factores claves para el suelo como temperatura, humedad del suelo y pH.
- **Enfermedades de las plantas.** Muchas aplicaciones de IoT enfocadas al monitoreo de enfermedades se han digitalizado para que el agricultor pueda tomar decisiones informadas mucho más rápido. En este punto el aprendizaje automático y el procesamiento de imágenes se utilizan para poder determinar la salud de las plantas.
- **Riegos.** IoT permite mejorar el riego tradicional a través de la revisión del tiempo actual y condiciones del suelo, esto permite reducir costos y optimizar el recurso hídrico.

6.3 IoT aplicado en cultivos de invernadero

IoT permite beneficios para las plantas utilizando en cualquier momento y lugar el seguimiento, control, y análisis. Para cultivos en invernadero se necesita de una alta precisión porque el cultivo se desarrolla en un entorno ambiental controlado y es allí donde el despliegue de IoT permite optimizar recursos como agua, fertilizante, entre otros. Esto genera altos niveles de rendimiento y esto beneficia directamente al agricultor.

Figura 19

Red WSN para monitoreo de SHM



Autores: Adaptado de: (Kassim, Mat, & Yussoff, 2019)

En la figura anterior podemos ver una red de sensores inalámbricos (WSN) que está monitoreando una casa de hongos inteligente en un invernadero. Los sensores envían los datos al panel de control inteligente, éste utiliza analítica de datos para poder tomar decisiones estratégicas sobre encendido y apagado del riego y de los sistemas, así como el tiempo más adecuado para encender los actuadores. (Kassim, Mat, & Yussoff, 2019)

6.4 Software de código abierto para la gestión agrícola

El software para agricultura inteligente es una herramienta que permite el monitoreo de parámetros ambientales, la gestión, maximización y optimización de los recursos. En tecnologías más avanzadas ya se integra inteligencia artificial para pronosticar rendimientos e ingresos esperados. Pero lo cierto es que no existe mucho software de código abierto con aplicaciones a la agricultura. A continuación, se mencionan algunos softwares de código abierto para agricultura disponibles:

- *Tambero*. Es un software de gestión agrícola basado en la web que permite la gestión de cultivos efectivamente. Además, incluye pronóstico del tiempo y es compatible manejos agrícolas, ganado, y gestión del mismo. (Tambero, 2021)
- *FarmOs*. Es otro software de gestión agrícola basado en web, que hace uso de la aplicación web Drupal que es usado en todo el mundo y proporciona infraestructuras para la gestión agrícola, planificación y mantenimiento de registros. (FarmOs, 2021)
- *Trimble*. Es un software de gestión basado en la web y que tiene un plan gratuito para los agricultores. Trimble permite que los agricultores accedan a los datos de pronósticos, clientes, gestión y registros de rendimiento, desde cualquier lugar del mundo gracias a su conexión a internet. (Trimble, 2021)
- *Farmathand*. Es otro software multiusuario agrícola que permite gestión de ventas, equipos e inventarios. (Farmathand, 2021)

- *Tania*. Es un software de gestión de granjas de código abierto basado en lenguaje de programación Go, Vue.JS y SQ Lite. Tania tiene licencia de Apache 2.0, lo que permite conectar sensores y gestionarlos. (Tania, 2021)
- *Farmrexx*. Es un software de gestión agrícola que permite seguimiento de equipos, registros, movimientos, productos, y registros meteorológicos. (Farmrexx, 2021)

6.5 Componentes electrónicos en sistemas IoT aplicados a la agricultura

Todo sistema IoT requiere de varios elementos fundamentales a nivel de electrónica para poder desarrollarse. (Puranik, Sharmila, Ranjan, & Kumari, 2019) en un artículo publicado en IEEE describen cuáles son algunos de los elementos más importantes usados en la automatización de sistemas IoT aplicados a la agricultura :

- **Arduino UNO**. Es una placa microcontroladora de código abierto basada en el microchip ATMEGA 328P y desarrollado por Arduino.cc. Es usado para la interfaz primaria de los dispositivos.
- **Pantalla cristal líquido 16x2**. Utilizada para la visualización de los datos a nivel local y operación del sistema independiente.
- **Sensor de pH**. Usado para obtener lecturas del suelo o sustrato. Esto permite encontrar la eficiencia o deficiencia de los pesticidas o fertilizantes.
- **Sensor DTH11**. Sensor usado para medición de temperatura y humedad, ya que estas son dos variables que afectan grandemente al crecimiento de las plantas. Si el cultivo se encuentra en un ambiente cerrado, este sensor puede usarse para regularlo.

- **Sensor de humedad del suelo o sustrato.** Se usa para monitorear el nivel de humedad del cultivo. Su uso se fundamenta en la ley de Ohm utilizando la resistencia entre los polos con el fin de calcular la humedad del suelo.
- **Módulo GSM.** El módulo GSM se usa con el fin de permitir la conectividad IoT y el monitoreo remoto. Este módulo envía los datos de los dispositivos a la nube para su análisis.

La automatización en agricultura integrando cultivos aeropónicos e hidropónicos puede permitir la creación en el futuro de un sistema que no requiera intervención humana, extrayendo cultivos orgánicos y más rápidos. Una visión futurista de una ciudad con edificios con granjas verticales, operando de forma autónoma, cultivando diferentes especies de plantas y generando oxígeno para la ciudad ya no es algo tan lejano en el tiempo, y es algo que poco a poco estamos empezando a ver. Por este motivo la próxima sección de este trabajo se enfocará en descubrir los proyectos más importantes de aplicación IoT en cultivos hidropónicos y aeropónicos pasando por continentes tan lejanos como Asia y Europa, hasta llegar a ver las implementaciones de este tipo que se han realizado en Colombia.

6.6 INTERNACIONAL

El uso de cultivos aeropónicos e hidropónicos basados en tecnologías ha sido tan ampliamente difundido en todo el mundo, que han sido estos los cultivos elegidos para la exploración espacial. Un claro ejemplo de esto es el caso del proyecto “*An Aeroponic Technology for Microgravity Plant Experiments on Earth*” desarrollado por investigadores indonesios de la GIDSTA (Agencia informática de desarrollo tecnológico

y espacio de Indonesia), donde se diseña un clinostato de tres ejes simulado por ingravidez. El objetivo del proyecto fue demostrar la viabilidad de los cultivos aeropónicos en condiciones de microgravedad. El proyecto demostró que el sistema de cultivo aeropónico se integra correctamente con el clinostato de tres ejes y se planea usarlo pronto en agricultura espacial real, dando un gran paso hacia la resolución del problema de demanda alimenticia en la exploración espacial. (Pochai, Sirijaturaporn, Jongjittanon, & Pimnoo, 2018)

Aterrizando la aplicación de IoT a hidroponía y aeroponía, en esta sección del trabajo se hará un resumen de algunos casos de éxito muy importantes que ponen de relieve el auge que han cobrado estas técnicas de cultivo alternativos. Se evidencia sus beneficios y campos de acción futuro planteados por los autores.

A. Proyecto de Monitoreo y Control del Sistema de Cultivo Aeropónico para la Producción de Papa. Indonesia 2012 (Idris & Ikhsan, 2012)

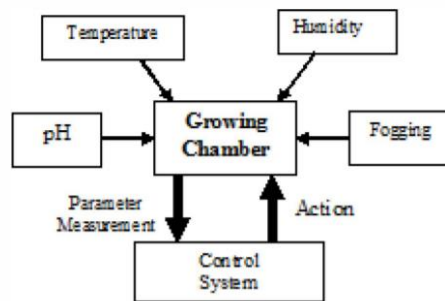
En Indonesia 2008 investigadores del instituto de tecnología de Bandung, desarrollaron un sistema de seguimiento y control para la distribución de agua y nutrientes en cultivos aeropónicos con el fin de optimizar el sistema de producción de patatas. El sistema se utilizó para monitorear los parámetros del ambiente cerrado o cámara del cultivo como humedad y temperatura. Por otro lado, el sistema de control gestionaba los actuadores para la entrega de agua y nutrientes. Los datos de temperatura y humedad se mostraban a través de una pantalla LCD y se transmitían a un computador para lograr realizar un seguimiento más efectivo del crecimiento de la planta. El objetivo era mantener los niveles de pH, temperatura, y humedad dentro de

la cámara de cultivo bajo los parámetros requeridos para un óptimo crecimiento de la papa.

El sistema de sensores medía los niveles de parámetros ambientales y luego enviaba la información al sistema de control. El sistema de sensores constaba de un sensor de humedad y otro de temperatura. El sistema de control por su parte recibía las mediciones y luego las comparaba con los resultados de los puntos de ajuste, si se encontraban diferencias entonces se enviaba una señal al subsistema del actuador compuesto por un microcontrolador que enviaba una señal al conductor para que activara el relé y encendiera el actuador. También contenía un sistema de alarma para verificar si el actuador era funcional. Todos los datos se mostraban a través de la pantalla LCD y el monitor de la computadora.

Figura 20.

Diagrama de bloques de la solución



Nota: adaptado de (Idris & Ikhsan, 2012)

Los investigadores concluyeron que el sistema aeropónico apoyado en tecnologías de monitoreo y control tiene más ventajas que otros métodos en términos de controlabilidad y uso de la nutrición. Además, se comparó con el sistema tradicional de cultivo y se encontró que el sistema aeropónico apoyado en tecnologías produjo más tubérculos. Lo cual resulta muy beneficioso y ventajoso para este tipo de cultivos.

Tabla 5.

Conclusiones de comparativa.

| PARAMETER | CONVENTIONAL [6] | HYDRO- PONIC[7] | AERO- PONIC |
|-------------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| Controllable | No | No | Yes |
| Nutrition usage | High | Medium | Low |
| Nutrition recirculation | Not Possible | Not Possible | Possible |
| Land usage | High | Medium | Low |
| Yield/Plant | 3-5 | 5-15 | Up to 30 |
| Use of Pesticide | Often | Occasionally | Never |
| Energy-Dependent | No | Yes | Yes |

Nota: Adaptado de (Idris & Ikhsan, 2012)

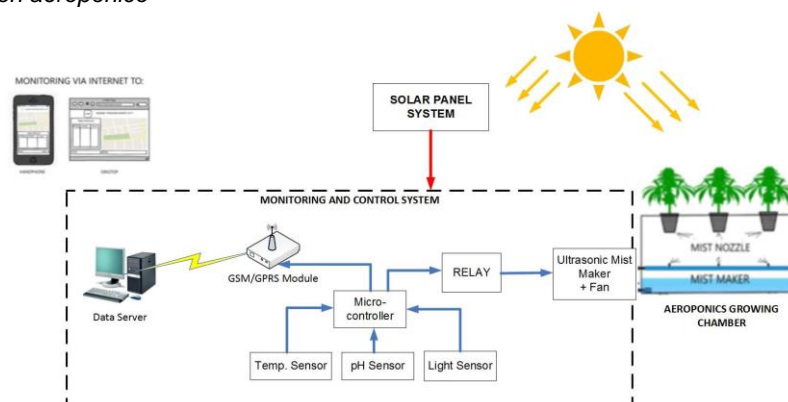
B. Sistema de control y monitoreo basado en la web para Cámara de cultivo aeroponía. Indonesia 2016 (Ikhsan, Siregar, Pujud, & Jauhari, 2016)

En 2016 investigadores de la universidad de Telkom en Bandung Indonesia, desarrollaron un cultivo aeropónico basado en un sistema de monitoreo para controlar los parámetros de temperatura, luz, y pH, y en un sistema de control usado para gestionar los actuadores de neblina y el ventilador para la humedad. Los datos de los sensores se transmitían a través de la red a un servidor para la supervisión por parte de los usuarios.

El sistema de control y monitoreo permitía automatizar los actuadores acordes a la configuración del usuario y monitorear los parámetros mencionados en la cámara del cultivo. Los datos enviados por los sensores de la cámara aeropónica al servidor podían ser consultados por los usuarios finales quienes se conectaban mediante navegadores web. La comunicación entre servidor y el nodo del sensor se realizaba mediante GSM/GPRS.

Figura 21.

Sistema IoT de supervisión aeropónico



Nota: adaptado de (Ikhsan, Siregar, Pujud, & Jauhari, 2016)

La investigación concluye que el monitoreo de las variables ambientales, la automatización del actuador en un período determinado de tiempo y que los datos que son enviados por el sensor al servidor permiten mostrar con éxito un método alternativo para el control y seguimiento de cultivos aeropónicos que genera mejores producciones y condiciones de cultivo. También indican que la investigación futura en este tipo de sistemas debe enfocarse en el monitoreo visual, es decir, el uso de cámaras dentro del monitoreo.

C. *Proyecto de sistema aeropónico vertical modular con cámaras ambientales conectadas a IoT. Manila, Filipinas, 2018* (Belista, y otros, 2018)

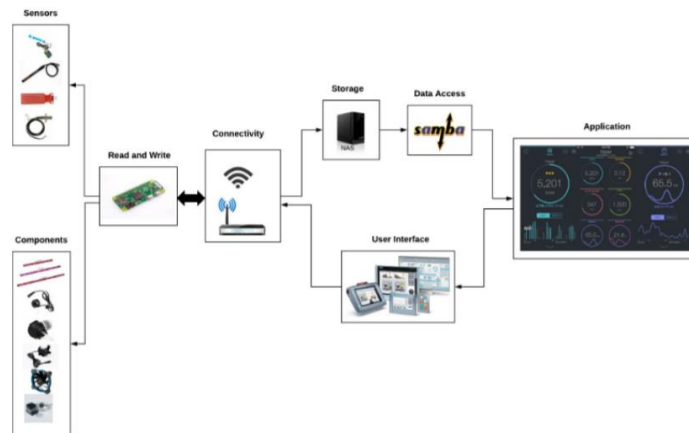
Investigadores de la universidad De La Salle en Manila Filipinas desarrollaron un sistema de cultivo aeropónico vertical que integra tecnologías IoT para controlar factores como temperatura, humedad relativa, luz y concentración de nutrientes en el agua con el fin generar las condiciones ideales para el crecimiento del cultivo. La

intención del proyecto es permitir que el proyecto se masifique dentro de los hogares de los consumidores.

El diseño del sistema se desarrolló con la idea de crear una red capaz de transmitir y recibir datos de la nube, entre un dispositivo externo, una computadora, o un móvil y el hardware real. En esta comunicación se monitorea la cámara de cultivo vertical modular desde la germinación hasta la cosecha y conecta todos los componentes con el usuario y la nube. Allí se integran la mezcla de nutrientes, ajuste de temperatura al grado requerido, humedad relativa necesaria, y la iluminación. También el sistema recopila datos de los sensores y los envía a la nube para poder ser interpretados a través de gráficos que son mostrados a los usuarios.

Figura 22.

Arquitectura IoT propuesta para la solución



Nota: adaptado de (Belista, y otros, 2018)

La investigación concluyó resaltando la importancia de la aplicación de tecnologías IoT dentro del sector agrícola ya que la recopilación de datos a través de los diferentes sensores permite monitorear el estado de crecimiento de los cultivos, y

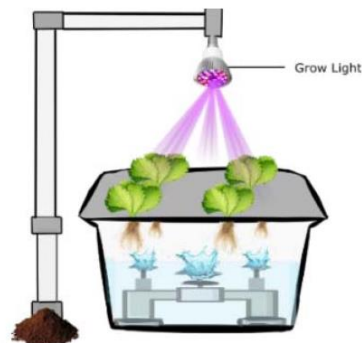
por ende controlar sus variables redundando esto en beneficios a nivel de producción y economía.

D. Proyecto Optimización del control de luces de crecimiento en IoT Sistemas aeropónicos con Sensor Fusion y Random Forest (Karuniawati, Putrada, & Rakhmatsyah, 2018)

Investigadores de la universidad de Telkom en Indonesia, realizaron un proyecto que permitió la optimización de la función de control de luces en cultivos aeropónicos basado en IoT, haciendo uso de la integración de sensores y Random Forest. Se hicieron varias pruebas con diferentes algoritmos de Random Forest para determinar el rendimiento del cultivo utilizando diferentes combinaciones de intensidad de luz, temperatura del agua, y humedad.

Figura 23.

Diseño del sistema aeropónico



Nota: adaptado de (Karuniawati, Putrada, & Rakhmatsyah, 2018)

Los resultados fueron un éxito comprobando que la integración sensores a través de IoT proporciona un fuerte impacto en los modelos de Random Forest aplicados, en consecuencia, se encontró que un modelo de tres sensores diferentes

entregas más precisión que un modelo de un solo sensor, llegando a resultados de precisión de 90.62% con respecto a 85.51%.

E. *Proyecto evaluación de desempeño de un invernadero ubicado en el desierto de Atacama, Chile, a través de IoT.* (Villarroel, Goykovic, Caiconte, & Barraza, 2019)

Investigadores de la asociación *Interciencia* en Venezuela, desarrollaron un proyecto de evaluación de un invernadero en el desierto de Atacama Chile en 2019, haciendo uso de una arquitectura de monitoreo compuesta de dispositivos inalámbricos conectados entre sí por medio de WiFi y protocolos de comunicación IEEE 802.15.4 con el fin de mejorar la eficiencia en el uso del agua. Los dispositivos de la arquitectura inalámbrica fueron sensores de temperatura y humedad ambiental conectados a un módulo inalámbrico 3G/4G. Los datos obtenidos se envían a un servidor a través de protocolos de IoT (protocolo MQTT) y son procesados a través de protocolos de IoT Cloud. La intención es poder tener información en tiempo real con la cual se puedan generar recomendaciones al agricultor con respecto al comportamiento del invernadero.

El resultado de este proyecto permitió monitorear el comportamiento de las variables abióticas del invernadero a través de sensores que envían la información a internet facilitando de esta manera el proceso de toma de decisiones respecto a la implementación de acciones acorde a los medios disponibles siempre con miras en ajustar los factores según los parámetros deseables para el cultivo y sus estados fenológicos. Se concluyó que el uso de dispositivos tecnológicos mecanizados permitió

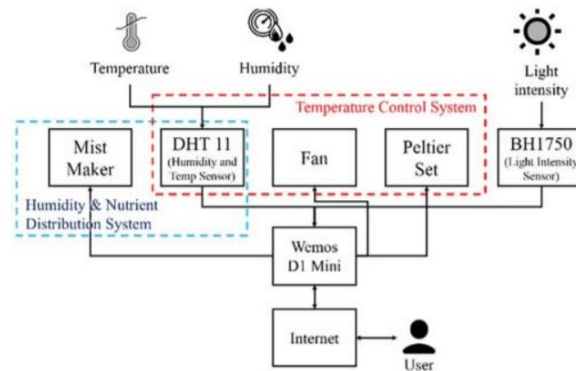
mejorar el ambiente operacional de las plantas y con ello lograr mayores rendimientos y calidad de las cosechas controlando los problemas fitosanitarios.

F. Proyecto Diseño e Implementación de Sistema IoT para Monitoreo de la temperatura de la cámara aeropónica (Jamhari & Annisa, 2020)

Investigadores de la universidad de Pertamina en Jakarta, Indonesia, desarrollaron un sistema aeropónico que hace uso del internet de las cosas para permitir supervisión remota y automatizada. La temperatura era monitoreada por un sensor DHT-11 conectado a la red a través de un módulo Wi-Fi. Dentro de la cámara aeropónica se pusieron actuadores mediante una celda Peltier, ventiladores y nebulizadores con el fin de controlar la temperatura y aportar los nutrientes necesarios a las raíces

Figura 24.

Diagrama esquemático del funcionamiento del proyecto



Nota: adaptado de (Jamhari & Annisa, 2020)

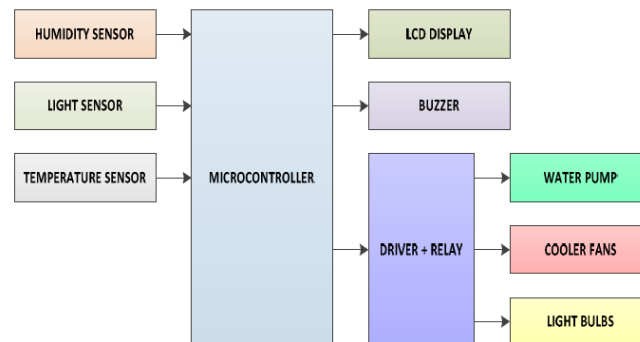
La aplicación del este sistema generó una disminución de la temperatura de la cámara radicular a un promedio de 28.8° que es lo ideal para el tipo de plantas cultivadas, versus 32.9° que era la temperatura de la cámara sin control ni monitoreo.

G. *Proyecto Sistema Automático de Monitoreo y Control en Agricultura de plantas aeropónicas* (Rahmad, Tanti, Puspasari, Ekadiansyah, & Fragastia, 2020)

En 2020 investigadores de la facultad de ingeniería y Ciencias de la Computación de la universidad de Potensi Utama en Medan, Indonesia desarrollaron un sistema de control automático para aeroponía. El sistema contiene una unidad principal de procesamiento y una interfaz ajustable para poder adaptarse a las necesidades de la planta cultivada. Integra información recopilada de sensores de temperatura, luz, y humedad que muestran sus datos en una pantalla LCD.

Figura 25

Diagrama esquemático del funcionamiento del proyecto



Nota: adaptado de (Jamhari & Annisa, 2020)

El sistema de monitoreo y control de humedad abre la bomba de aspersión cuando la humedad relativa se encuentra por debajo del valor especificado. También el sistema puede aumentar la ventilación y reducir el riesgo de planta cuando la humedad relativa está por encima del valor especificado. Respecto a la variable lumínica, la bombilla se apaga cuando la luz es alta y se enciende cuando es baja. Y con la

temperatura, el usuario tiene la opción de ajustarla a la deseada, para ello el sistema enciende el ventilador cuando la temperatura esté por encima de la deseada.

Los resultados de este trabajo mostraron ahorros en mano de obra y aumento del valor económico del producto generado gracias a la integración de tecnología de monitoreo y control en el dispositivo. Además, se demostró un mayor crecimiento de los tallos de las plantas, adición de hojas y tamaño de la raíz, adicionando 10 cm al tallo, 4 hojas, y el doble de tamaño la raíz al cabo de 3 semanas, acercándose al tiempo ideal para cosechas de plantas de Espinaca que es de 3 semanas.

H. Proyecto: Monitoreo y control de hidroponía inteligente Uso de aplicaciones web y de Android (Muhammad, Rizalul, & Rosmiati, 2021)

En 2021 investigadores de la universidad de Telkom en Bandung, Indonesia, diseñaron un sistema basado en IoT para monitoreo y control de un sistema hidropónico. La intención de los desarrolladores era monitorear la cantidad de nutrientes vegetales, temperatura y el pH del agua con el fin de mantener estas variables dentro de los parámetros requeridos por las necesidades de la planta y de esta manera garantizar un óptimo crecimiento. Para ello se diseñó un sistema hidropónico inteligente usando un medidor de sólidos disueltos (Tds) para monitorear el contenido de los nutrientes en el agua, un sensor de pH y un sensor Ds18B20 para temperatura ambiental y que tiene conexión con Arduino, de esta manera poder garantizar el monitoreo. Toda la información recogida por los sensores se envía a Firebase para usarla como base de datos y gracias a esto aplicaciones Web y Android pueden acceder a ella y visualizar la información con el fin de entregarla a los agricultores.

Los investigadores concluyeron que el desarrollo de este sistema permitió controlar con éxito el desarrollo y crecimiento de las plantas en medios acuáticos. Esto mejora el acceso de los agricultores para el control de la temperatura alrededor del medio hidropónico gracias a su manejo por aplicativos Web o por medio de Android. Otra conclusión valiosa fue que gracias a este sistema se pudo automatizar la planta permitiendo que la nutrición de la misma equilibrada y acorde con los parámetros requeridos y también el pH del agua. Se encontró que este sistema inteligente generó una precisión del 98% en comparación a la medición manual de pH, temperatura y TDS. Por último, indicaron que, en una encuesta realizada a los agricultores hidropónicos, se encontró que el 84.72% de los mismos concordó en que este sistema facilita el acceso, monitoreo y control del cultivo.

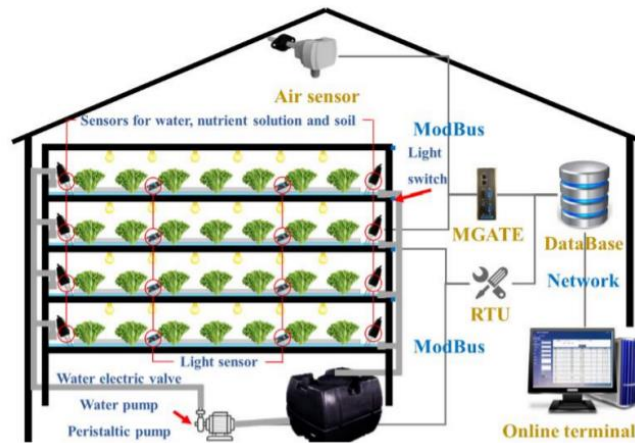
En cuanto a futuras mejoras y campos de estudio, los autores indican la importancia de integrar tecnologías LoRa como medio de comunicación para enviar datos del sensor al receptor y el uso de notificaciones basadas en SMS.

I. *Fábrica inteligente de plantas medicinales.* (Hisang-Jen & Chung-Chih, 2019)

En 2019 investigadores del departamento de informática de Chang Gung en Taiwán, un conjunto de métodos para monitorear el historial de producción de plantas hidropónicas y aplicar técnicas de GACP (buenas prácticas agrícolas y de recolección) usando internet de las cosas para recopilar y controlar datos y la aplicación de inteligencia artificial para análisis de los datos y obtener mejoras en las condiciones de crecimiento del cultivo.

Figura 26

Arquitectura esquemática del sistema



Nota: adaptado de (Hisang-Jen & Chung-Chih, 2019)

6.7 NIVEL NACIONAL

Las técnicas de cultivos alternativos como la hidroponía y aeroponía han sido consideradas en Colombia como las más apropiadas para cosechar debido a los entornos socio económicos actuales de los centros urbanos, gracias a su sencillez, limpieza, economía y que permiten la producción de cualquier planta, ya sea ornamental, medicinal, o de producción alimentaria. (Forero, Parra, Luna, & Rivera, 2011)

A continuación, se resumen algunos de los proyectos más importantes que se han implementado en técnicas de cultivos aeropónicos e hidropónicos en el país, su impacto, beneficios y las recomendaciones sobre campos de acción futuros en estos cultivos.

A. *Proyecto: Automatización de cultivos aeropónicos de cilantro libres de pesticidas* (Hoyos, Candelo, & Chavarría, 2018)

En 2018 investigadores de la Universidad Nacional y la empresa Aeropónicos de Colombia, unieron fuerzas para desarrollar un proyecto cuyo objetivo era el desarrollo de un sistema de energía eléctrica para la producción limpia de alimentos generados aeropónicamente, y sin pesticidas. El sistema completo incluye un invernadero, camas de cultivo, un sistema de riego, bombas de agua, dispensador de nutrientes, suministro de red eléctrica, hardware para el control de los algoritmos inteligentes integrados en el sistema, algoritmos de optimización de procesos, y fuentes alternativas de energía. El resultado mostró mejoras muy importantes en el crecimiento de las plantas sin pesticidas, como puede verse en la tabla siguiente:

Tabla 6

Comparación de cultivo aeropónico y cultivo en tierra

| Cilantro cultivation (aeroponics vs land) | | | | | | |
|---|--------------------|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| Type of Crop | Harvest Losses (%) | Production (kg/m ²)/year | Agrochemical consumption (%) | Nutrients Price (\$/bed/year) (%) | Workforce (%) | Degree of Phytopathological risk (%) |
| Aeroponics | 8% | 89.5 | 10% | 40% | 30% | 30% |
| Land | 20% | 18 | 100% | 100% | 100% | 100% |

Nota: adaptado de (Hoyos, Candelo, & Chavarría, 2018)

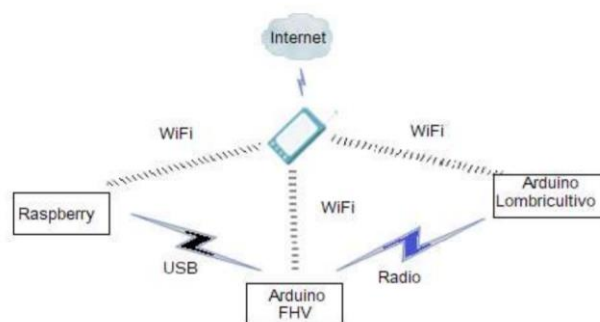
Estos resultados muestran la clara ventaja del cultivo aeropónico en comparación con cultivos en tierra, en términos de producción por metro cuadrado. También se concluyó que al ser un cultivo desarrollado en un área cerrada se reduce el uso de agroquímicos, y pesticidas para controlar los riegos fitopatológicos así como los costos en uso de plaguicidas, el número de trabajadores que se requieren, y se producen alimentos más limpios y sanos.

B. *Proyecto: Automatización de la producción de Forraje Verde Hidropónico y Abono-Orgánico en la Granja Cunicola Autosustentable en el Municipio de Mutiscua Colombia (Santos & Lizcano, 2020)*

En 2019 investigadores de la Universidad de Pamplona desarrollan un proyecto cuyo fin es la automatización de una granja Cunicola en Mutiscua Norte de Santander. Esta automatización permite integrar dos procesos importantes en la planta: la producción de abono orgánico en el Lombricultivo, y Forraje Verde Hidropónico en el invernadero. Las tareas repetitivas se reemplazaron con dispositivos electrónicos y se desarrolló un sensado muy fuerte sobre las variables involucradas en los procesos tomando las acciones de control necesarias para el funcionamiento de la granja. La automatización se desarrolla con sistemas embebidos de bajo costo como Arduino, y Raspberry. Las variables sensadas son temperatura, humedad, rayos solares (radiación), nivel de agua del tanque, temperatura del agua y humedad ambiente.

Figura 27.

Descripción general de las conexiones del sistema



Nota: adaptado de (Santos & Lizcano, 2020)

Los autores concluyen recalcando la importancia de la automatización en este tipo de procesos productivos ya que es amigable con el medio ambiente, genera menos costos, y permite el uso de energías limpias. También concluyen la importancia de mayor investigación en el campo del acceso a internet a zonas remotas y rurales, ya que este es un problema que impide el mejor aprovechamiento y desarrollo del internet de las cosas.

C. Diseño e implementación de un sistema de control de riego para prototipo automatizado de cultivos aeropónicos de cilantro (Carvajal, 2019)

En 2019 un estudiante de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, desarrolla como proyecto de grado un sistema de control de riego para cultivos aeropónicos de cilantro. El sistema de riego permite la supervisión y registro de los datos obtenidos a partir de las variables de humedad relativa, temperatura, y pH garantizando con esto el riego adecuado para el cultivo, la disminución de pérdida de agua y nutrientes en el sistema.

D. Proyecto: diseño de una solución IoT para monitoreo de las condiciones óptimas de un cultivo hidropónico de flores en invernadero (Briceño & Cubides, 2020)

En 2020 un estudiante de ingeniería electrónica de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, desarrolla como tesis de grado un proyecto que busca integrar tecnologías IoT para la monitorización de condiciones ambientales que afectan el proceso de producción en cultivos de flores hidropónicos. El sistema de monitoreo está articulado a una página web donde el agricultor puede visualizar la información sensórica. Entre los resultados más importantes de este proyecto encontramos el

diseño completo de toda la arquitectura de monitoreo de flores de invernadero haciendo uso de IoT.

E. Proyecto: Adquisición de datos para el monitoreo remoto de variables de un cultivo vertical a través de una plataforma IoT. (Plazas, 2020)

En 2020 en Medellín Colombia, estudiantes de la Universidad de Antioquia desarrollan un sistema IoT basado en protocolo LoRa para la gestión de cultivos verticales hidropónicos. Este sistema permite el monitoreo remoto de variables como pH, humedad, conductividad eléctrica, temperatura, humedad relativa, e intensidad lumínica a través de la plataforma Sentilo. Como resultado se registran parámetros del cultivo tomados en un intervalo de tiempo permitiendo al agricultor poder tomar decisiones correctas respecto al suministro de nutrientes, control de riego, entre otros aspectos. El autor propone como trabajo futuro la construcción de sistemas inteligentes a partir de los datos suministrados por los sensores, haciendo uso de machine learning.

7. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE EN PUBLICACIONES, E INVESTIGACIONES SOBRE PROYECTOS IOT APLICADO A CULTIVOS AEROPÓNICOS E HIDROPÓNICOS Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Para la revisión de la literatura existente se usaron dos (2) motores de búsqueda en bases de datos: IEE Explore Scopus, y otros fuentes de búsqueda. A continuación, se resumen las estadísticas.

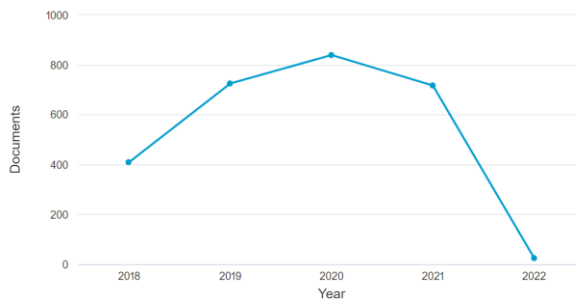
SCOPUS

Cadena de búsqueda: TITLE-ABS-KEY (iot AND in AND agriculture)

Se obtienen 2715 resultados en publicaciones de los años 2018-2021.

Figura 28

Gráfico de publicaciones sobre IoT en la agricultura



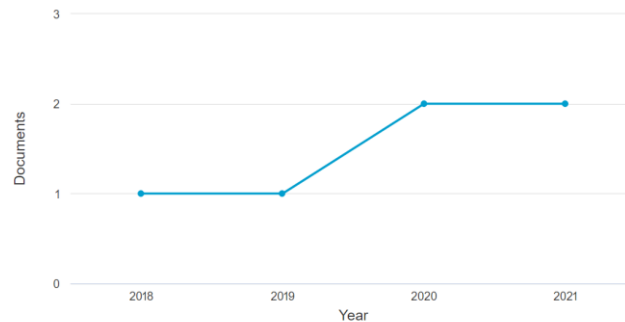
Como podemos observar se tiene numerosa literatura de proyectos de IoT aplicados a la agricultura. El año 2020 fue el año donde más publicaciones se realizaron en Scopus llegando a superar las 800 y en 2021 ha caído un poco llegando a un poco más de las 700 en lo que va del año.

Cadena de búsqueda: (TITLE-ABS-KEY(loT in Aeroponic Systems))

Se obtienen 6 resultados en publicaciones de los años 2012-2021.

Figura 29

Gráfico de publicaciones sobre IoT en sistemas aeropónicos



Como podemos ver, en Scopus tenemos pocas publicaciones sobre IoT en sistemas aeropónicos específicamente, siendo el año 2020-2021 los años de más publicaciones.

Cadena de búsqueda: TITLE-ABS-KEY (biot AND ion AND hydroponic AND systems)

No se obtienen resultados de IoT aplicado a la hidroponía específicamente.

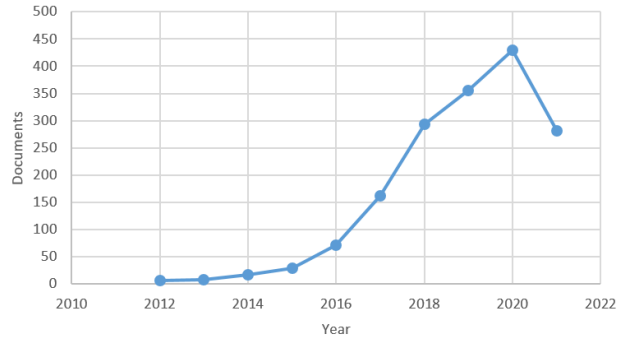
IEEE

Cadena de búsqueda "All Metadata":IoT in agricultura

Se obtienen 1652 resultados en los años 2012-2021

Figura 30.

Gráfico de publicaciones sobre IoT en agricultura 2012-2021



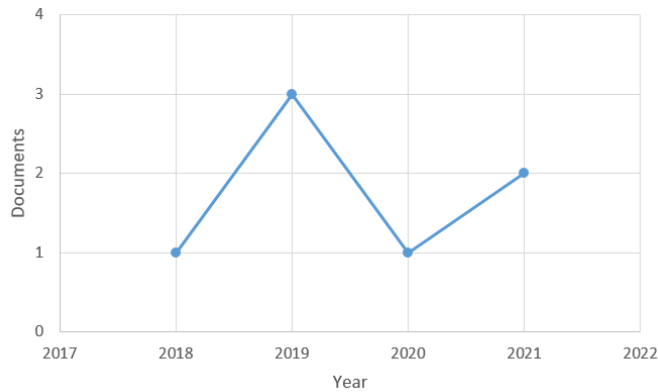
Como podemos visualizar, la cantidad de material bibliográfico disponible es numeroso, siendo el año 2020 donde más publicaciones se hicieron al respecto.

Cadena de búsqueda "All Metadata":IoT in aeroponics systems

Se encuentran un total de siete (7) publicaciones en IEEE. Entre los años 2012-2021.

Figura 31

Gráfico de publicaciones sobre IoT en sistemas aeropónicos 2012-2021



En el caso de IEEE podemos ver que en 2019 fue el año donde más publicaciones se tuvo.

Cadena de búsqueda "All Metadata":IoT in hidroponycs systems

No se obtienen resultados de IoT aplicado a la hidroponía específicamente.

7.2 SÍNTESIS DEL ESTADO DEL ARTE

Tabla 7.

Síntesis del estado del arte

| Result Number | Authors | Title | Year | Source title | Objective |
|---------------|---|---|------|---|--|
| | SCOPUS | | | | |
| 1 | Karuniawati S., Gautama Putrada A., Rakhmatsyah A. | Optimization of grow lights control in IoT-based aeroponic systems with sensor fusion and random forest classification | 2021 | Proceeding - 2021 International Symposium on Electronics and Smart Devices: Intelligent Systems for Present and Future Challenges, ISESD 2021 | Optimizar la función de control de la luz de crecimiento en un sistema aeropónico basado en IoT que utiliza el concepto de fusión de sensores y clasificación forestal aleatoria. |
| 2 | Park S, Kim J. | Design and implementation of a hydroponic strawberry monitoring and harvesting timing information supporting system based on nano ai-cloud and iot-edge | 2021 | Electronics (Switzerland)Open AccessVolume 10, Issue 12 | Diseñar e implementar un sistema integrado que monitorea los datos ambientales hidropónicos de fresa y determina cuándo cosechar con el concepto de IoT-Edge-AI-Cloud. El sistema de monitoreo propuesto recopila, almacena y visualiza datos del entorno de cultivo de fresas. |
| 3 | Mya K.T, Myint Sein M, Thi Soe Nyunt T.H.I, Wey Chong Y, Nat. Zainal R.E.R. | Automatic data-driven agriculture system for hydroponic farming | 2021 | ACM International Conference Proceeding Series | Diseñar un sistema que controlará automáticamente los valores de Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Totales Disueltos (TDS), niveles de líquidos y potencia de hidrógeno (pH) para mejorar la Siembra Hidropónica. Este sistema está desarrollado en base a Neural Network para autoajustar el valor de hidrógeno (pH) y nutrientes en la granja de lechugas. Está diseñado para permitir la recopilación de datos sin problemas de varios tipos de sensores en condiciones de granjas urbanas. |

| | | | | | |
|---|---|--|------|---|--|
| 4 | Al-Gharibi R.S | IoT-Based Hydroponic System | 2021 | 2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking, ICSCAN 2021 | Diseño de un sistema hidropónico basado en la tecnología de Internet de las cosas para proporcionar un entorno de cultivo flexible. Para ello el sistema monitorea parámetros como temperatura, humedad, temperatura del agua, TDS, pH e intensidad de luz a través de Wi-Fi en la plataforma Blynk. |
| 5 | Manohar G, Sundari V.K, Pious A.E, Beno A, Anand L.D.V, Ravikumar D | IoT based Automation of Hydroponics using Node MCU Interface | 2021 | Proceedings of the 3rd International Conference on Inventive Research in Computing Applications, ICIRCA 2021 | Desarrollar varias cosechas cuyas características se guarden en la nube, para ello se hace uso del módulo nodemcu que está interconectado con IOT. La necesidad de IOT es enviar la información recuperada a la web (almacenamiento masivo) y la PC está acostumbrada a comunicar el estado actual al cliente a través de la web con el objetivo de que la verificación y el soporte sean más simples |
| 6 | Narimani M., Hajiahmad A., Moghimi A., Alimardani R., Rafiee S., Mirzabe A.H. | Developing an aeroponic smart experimental greenhouse for controlling irrigation and plant disease detection using deep learning and IoT | 2021 | American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2021 | Desarrollar y probar un invernadero aeropónico inteligente a escala experimental donde el estado de la planta de geranio y las condiciones ambientales se monitorean continuamente a través de la integración de Internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial (AI). |
| 7 | Lucero L., Lucero D., Ormeno-Mejia E., Collaguazo G. | Automated aeroponics vegetable growing system. case study lettuce | 2020 | 2020 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2020 | Implementar un sistema de cultivo aeropónico automatizado para un cultivo de lechuga de hoja verde, controlando parámetros de temperatura, humedad y tiempo de riego, mediante nebulización de nutrientes para las raíces de las plantas a través de un sistema de bajo costo basado en Arduino con una herramienta de Internet de las cosas (IoT) para monitorear variables de forma remota mediante la conexión a un servidor web. |
| 8 | Jamhari C.A., Wibowo W.K., Annisa A.R., Roffi T.M. | Design and Implementation of IoT System for Aeroponic Chamber Temperature Monitoring | 2020 | Proceeding - 2020 3rd International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering: Strengthening the framework of Society 5.0 through Innovations in Education, Electrical, Engineering and Informatics Engineering, ICVEE 2020 | Diseñar e implementar de un sistema aeropónico a escala de laboratorio que emplee Internet de las cosas (IoT) para monitorear en línea de forma automatizada. Para ello se construye un sistema aeropónico que consta de una cámara de crecimiento y una cámara de raíces para 6 plantas vegetales. |

| | | | | | |
|--------------------|---|---|------|---|---|
| 9 | Belista F.C.L., Go M.P.C., Lucenara L.L., Policarpio C.J.G., Tan X.J.M., Baldovino R.G. | A smart aeroponic tailored for IoT vertical agriculture using network connected modular environment al chambers | 2019 | 2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, HNICEM 2018 | Diseñar de un sistema agrícola modular habilitado para Internet que aborde la necesidad de que las personas se ocupen en gran medida de sus cultivos en crecimiento. El sistema controlará factores como la temperatura, la luz, la humedad relativa y la concentración de nutrientes en el agua para que los cultivos crezcan en condiciones ideales |
| 10 | Ikhsan, Muhammad; Siregar, Simon; Pujud, Aris; Jauhari, Rakhmi | Web-Based Monitoring and Control System for Aeroponics Growing Chamber | 2016 | International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC) | Diseñar e implementar un prototipo de sistema para la distribución de agua y nutrientes de las plantas. Además, se ha implementado para apoyar la aplicación óptima del sistema aeropónico. Se basa en un sistema de monitoreo que se utilizó para observar los parámetros de la cámara de cultivo aeropónico como temperatura, luz y pH. |
| 11 | Saraswati I., Dwi Puspitasari V., Anggoro S.P., Alimuddin A., Firmansyah T., Oktorida Khastini R., Mardono U. | Applications of temperature and humidity monitoring system at aeroponic plants based on IoT | 2018 | MATEC Web of Conferences | Diseñar un sistema de monitorización basado en Android. Este sistema es utilizado para monitorear el cambio de parámetros. Estos parámetros incluyen temperatura y humedad. El sistema de monitoreo basado en Android usa programación Java y es de código abierto, además el usuario puede monitorear el desarrollo de las plantas de espinaca, mirando los datos que se han almacenado en la base de datos para que los usuarios puedan conocer el desarrollo de la planta. Se puede acceder a esta aplicación a través de un teléfono inteligente con sistema operativo Android como servidor cliente. |
| IEE EXPLORE | | | | | |
| 12 | Henry C.K. Tang; Tiger Y.S. Cheng; Joe C.Y. Wong; Ray C.C. Cheung; Alan H.F. Lam | Aero-Hydroponic Agriculture IoT System | 2021 | 2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT) | Diseño de un sistema IoT con sensores para monitorear la temperatura, la humedad, el valor de pH de los nutrientes y la tasa de crecimiento de los cultivos. Esos parámetros ambientales pueden controlarse para ofrecer las condiciones adecuadas para cultivar los cultivos |

| | | | | | |
|----|--|--|------|---|--|
| 13 | Iwan Fitrianto Rahmad; Lili Tanti; Ratih Puspasari; Evri Ekadiansyah; Vidi Agung Fragastia | Automatic Monitoring and Control System in Aeroponic Plant Agriculture | 2020 | 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA) | Automatizar el monitoreo del ambiente de un invernadero y automatizar el nivel de PH y el mantenimiento de la conductividad eléctrica. IOT se usa para transferir los datos recuperados a Internet (almacenamiento masivo) y la aplicación móvil se usa para comunicar el estado actual al usuario a través del uso de Internet a sus teléfonos móviles, de modo que el monitoreo y el mantenimiento sean más fáciles. |
| 14 | Chris Jordan G. Aliac; Elmer Maravillas | IOT Hydroponics Management System | 2018 | 2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM) | Diseño de un sistema integrado basado en Internet of Things (IoT) para el seguimiento y gestión del jardín hidropónico proporcionando el entorno ideal para que las plantas crezcan, un sistema donde el pH, el nivel del agua, la temperatura del aire y la humedad relativa se controlan constantemente |
| 15 | K. Tatas; A. Al-Zoubi; A. Antoniou; D. Zolotareva | iPONICS: IoT Monitoring and Control for Hydroponics | 2021 | 2021 10th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST) | Diseñar e implementar un sistema de control y monitoreo inteligente y de bajo costo basado en IoT para invernaderos hidropónicos. El sistema se basa en tres tipos de nodos sensores: El nodo principal (maestro) es responsable de controlar la bomba, monitorear la calidad del agua en el invernadero y agregar y transmitir los datos de los nodos esclavos. |
| 16 | M. S. Gour; V. Reddy; V. M.; S. N.; Vishuvarthan; V. T. Ram | IoT based Farming Techniques in Indoor Environment : A Brief Survey | 2020 | 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES) | Discutir las tecnologías existentes y proporcionar un enfoque eficiente para el crecimiento preciso de las plantas con menos uso de agua y una necesidad mínima de nutrientes mediante la técnica de aeroponía basada en el aprendizaje automático con múltiples parámetros de entrada como la humedad, temperatura, flujo de aire, nutrientes, dióxido de carbono e intensidad de la luz. |

| | | | | | |
|----|--|--|------|--|---|
| 17 | Idris, Irman; Ikhsan, Muhammad; | Monitoring and Control of Aeroponic Growing System for Potato Production | 2012 | IEEE Conference on Control, Systems and Industrial Informatics (ICCSII) | Diseño de un sistema de seguimiento y control destinado a la distribución de agua y nutrientes para apoyar la aplicación óptima del sistema de cultivo aeropónico para la producción de patatas de siembra. El sistema de monitoreo se utilizó para dar seguimiento a los parámetros de la cámara, como la temperatura y la humedad. Por su parte el sistema de control se utilizó para gestionar los actuadores en el suministro de agua y nutrientes. Los datos de temperatura y humedad se mostrarán en la pantalla LCD y se transmitirán a la computadora para facilitar el monitoreo de la cámara de cultivo de plantas. |
| 18 | A. R. Chaudhry; V. P. Mishra | A Comparative Analysis of Vertical Agriculture Systems in Residential Apartments | 2019 | 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET) | Revisar los métodos y técnicas existentes utilizados para los cultivos en entorno interior con sistemas de apilamiento variable, temperatura controlada, iluminación LED y riego mediante hidroponía, aeroponía o acuaponía. |
| 19 | Hisang-Jen, H; Chung-Chih, L | Intelligent Medicinal Plant Factory | 2019 | Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris) | Investigar el desarrollo de un conjunto de métodos para el seguimiento del historial de producción de plantas cultivadas en suelo o hidropónico y la inspección de calidad durante todo el proceso de siembra hasta la entrega final, ya que se utilizó Buenas Prácticas Agrícolas y de Recolección (BPC) como la arquitectura del currículum vitae de las plantas medicinales, mientras que la Internet de las cosas (IoT) bajo la tecnología de redes ayudaría a recopilar y controlar los datos. |
| 20 | Muhammad, Ivan; Rizalul, Mohammad; Rosmiati, Mía | Monitoring And Controlling Smart Hydroponics Using Android and Web Application | 2021 | 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology | Diseño e implementación de un sistema que monitoree y controle las necesidades de la cantidad de nutrición de la planta, el pH del agua y la temperatura del ambiente de la planta. A través de hidroponía inteligente que utiliza un medidor de Tds (sólidos disueltos totales) para medir el contenido de nutrientes disueltos en agua, un sensor de bricolaje más para medir el pH del agua, así como el sensor Ds18b20 que se usa para medir el sensor de temperatura ambiental y está conectado al Arduino Uno como un microcontrolador para que el sistema pueda monitorear los parámetros de la planta hidropónica. en tiempo real |

| | | | | | |
|----------------------------------|---|---|------|--|---|
| 21 | Rahmad, Iwan; Tanti, Lily; Puspasari, Ratih; Ekadiansyah, Evri; Fragastia, Vidi | Automatic Monitoring and Control System in Aeroponic Plant Agriculture | 2020 | El 8th Conferencia Internacional sobre Gestión de Servicios Cibernéticos y de TI | Implementar un sistema de control automático para aeroponía. Este sistema contiene un lattepanda como unidad principal de procesamiento y una interfaz ajustable para adaptarse a las necesidades de la planta cultivada. Obtiene información de sensores de temperatura, sensores de luz y sensores de humedad y muestra la salida en el módulo de pantalla LCD. Los resultados del sistema se simulan con la ayuda de un software de simulación. |
| 22 | H. Chang; J. Wang; C. Lin; C. Chen | An Agricultural Data Gathering Platform Based on Internet of Things and Big Data | 2018 | 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C) | Diseñar una plataforma de recopilación de datos agrícolas eficiente y simple basada en Internet de las cosas (IOT) y big data. Este trabajo de acuerdo con el sistema propuesto puede lograr un bajo costo de control. En lugar de utilizar un sistema informático basado en la nube, este estudio utiliza la interfaz de la guía del usuario (GUI) |
| OTROS MOTORES DE BÚSQUEDA | | | | | |
| 23 | Villaruel, Carlos; Goykovic, Vitelio; Caiconte, Collao; Barraza, Manuel | EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UN INVERNADERO UBICADO EN EL DESIERTO DE ATACAMA, CHILE, A TRAVÉS DE IoT | 2019 | Asociación Interciencia Venezuela | Evaluar de forma remota el comportamiento de un invernadero, ubicado en el desierto de Atacama, norte de Chile, realizado con la finalidad de mejorar la eficiencia del uso del agua. La arquitectura de monitoreo propuesta se compone de dispositivos inalámbricos conectados entre sí por medio de WiFi y protocolos de comunicación inalámbrica de la IEEE tales como el 802.15.4. Los dispositivos empleados en la arquitectura fueron sensores de temperatura y humedad ambiental, conectados a un módulo inalámbrico WiFi, el que envió los datos a un router con conexión 3G/4G |
| 24 | Hoyos, F; Candelo, J; Chavarría, H | Automatización de cultivos aeropónicos de cilantro libres de pesticidas | 2018 | INGE CUC, vol. 15 | Implementar una fuente autónoma de suministro energético y un sistema de control del riego para la producción de alimentos libres de pesticidas. |

| | | | | | |
|----|---------------------------|---|------|--|---|
| 25 | Santos, J; Lizcano, J | Automatización de la producción de Forraje Verde Hidropónico y Abono- Orgánico en la Granja Cunicola Autosustentable en el Municipio de Mutiscua Colombia | 2020 | Revista Iberica de Sistemas e Tecnologías de Informacao | Automatizar una granja Cunicola autosustentable ubicada en el municipio de Mutiscua – Norte de Santander-Colombia. La automatización integra dos procesos de la granja, los cuales son la producción de abono orgánico en el Lombricultivo y la de Forraje Verde Hidropónico en el invernadero. Gran parte de las tareas repetitivas que se realizaban con mano de obra, fueron reemplazadas por dispositivos electrónicos, manteniendo un sensado estricto sobre las diferentes variables involucradas y tomando las acciones de control necesarias para el correcto funcionamiento de la granja. La implementación se realizó con sistemas embebidos de bajo costo como Arduino y Raspberry logrando cumplir la mayoría de los requerimientos solicitados para la automatización, con respuestas eficientes por parte de los actuadores |
| 26 | Carvajal, G; | Diseño e implementación de un sistema de control de riego para prototipo automatizado de cultivos aeropónicos de cilantro | 2019 | Universidad nacional abierta y a distancia – UNAD Escuela de ciencias básicas, tecnologías e ingenierías | Desarrollar un sistema de control de riego para un prototipo automatizado de cultivos aeropónicos de cilantro, en el cual se va a determinar e implementar el controlador y la interfaz gráfica, incluyendo dos variables importantes que son humedad relativa y temperatura dentro de la cámara donde se encuentra las raíces de las plantas, además de permitir la interacción con el usuario y la supervisión del PH en el agua. |
| 27 | Briceño, M; Cubides, W | DISEÑO DE UNA SOLUCIÓN IOT PARA MONITOREO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE FLORES EN INVERNADERO | 2020 | UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA FACULTAD DE INGENIERÍAS | Diseñar un sistema de monitoreo para el cultivo hidropónico de flores en invernadero empleando IoT. |
| 28 | Plazas, M; | ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL MONITOREO REMOTO DE VARIABLES DE UN CULTIVO VERTICAL A TRAVÉS DE UNA | 2020 | Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Universidad de Antioquia | Desarrollar un nodo sensor inteligente que permita el monitoreo de variables de un cultivo vertical, usando una plataforma IoT, para la gestión de cultivos en zonas urbanas. |

Como podemos ver, de la totalidad de artículos consultados, se seleccionan 28 publicaciones con temas relevantes a este trabajo.

7.3 ANÁLIS DE TENDENCIAS EN EL ESTADO DEL ARTE

Luego de la revisión y clasificación de las publicaciones sobre los proyectos enfocados en IoT para hidroponía y aeroponía se darán algunos análisis con respecto a las tecnologías y herramientas IoT que más se están implementando a nivel de capa percepción y capa de red. La capa de aplicación hace referencia a los proyectos implementados de los cuales ya hemos hablado ampliamente.

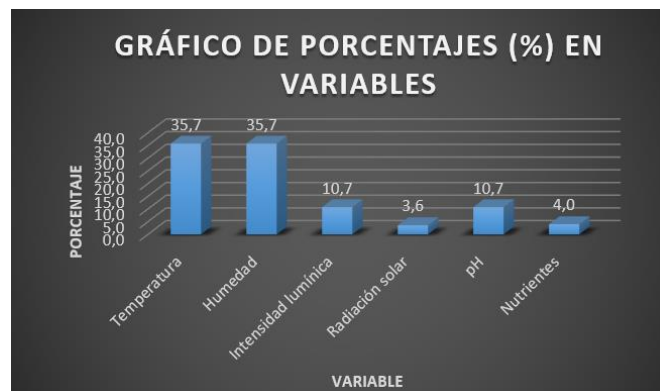
Capa de percepción

Las herramientas a nivel de hardware se seleccionaron a partir de las 28 publicaciones entre las que se encontraban artículos, libros, y tesis. Los resultados son los siguientes:

Variables recolectadas por los sensores

Figura 32.

Recolección de datos mediante variables. En los proyectos internacionales

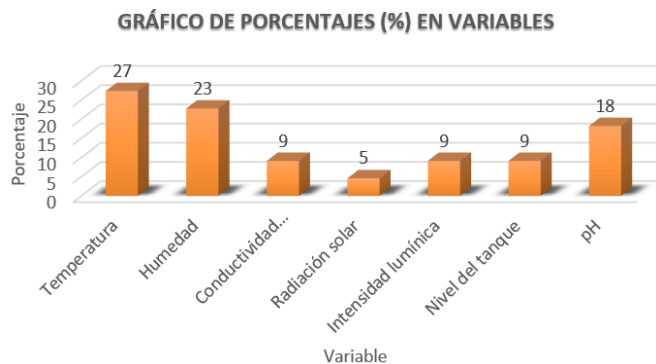


Como podemos observar, en la figura 26 vemos que la clara tendencia en los proyectos analizados es hacia la aplicación de sensores de temperatura y humedad

(ocupando casi el 72% de los proyectos). El pH y la intensidad lumínica también tienen un importante interés por parte de las aplicaciones de IoT (con casi un 22% entre ambos) y por último tenemos medición de nutrientes y radiación solar con casi un 8%.

Figura 33.

Recolección de datos mediante variables. En los proyectos nacionales

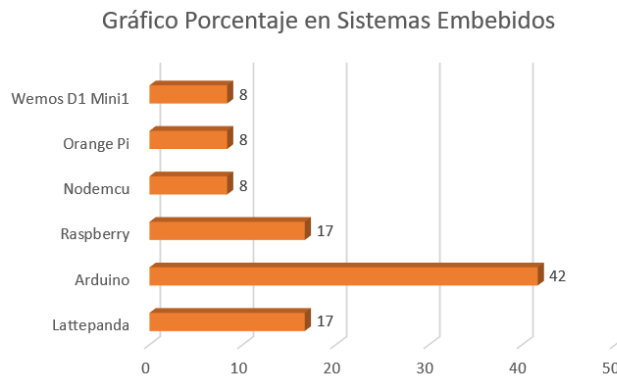


En la figura 27 podemos ver que la temperatura en los proyectos IoT en Colombia es la variable más recolectada con un 27%, seguida de humedad con un 23%, pH con un 18%, y luego tenemos conductividad eléctrica, intensidad lumínica, y nivel del tanque de nutrientes con 9% cada uno. Por último, está el nivel de radiación solar con un 5%.

Hay algunas diferencias importantes entre los proyectos nacionales e internacionales. En los internacionales se trabaja la variable de concentración de nutrientes y conductividad eléctrica, mientras que en Colombia se mide más el nivel del tanque de nutrientes. Por lo demás las tendencias en ambos tipos de proyectos están siempre hacia medir temperatura, humedad, y pH en primer lugar, siendo estas variables fundamentales para el óptimo desarrollo de la planta.

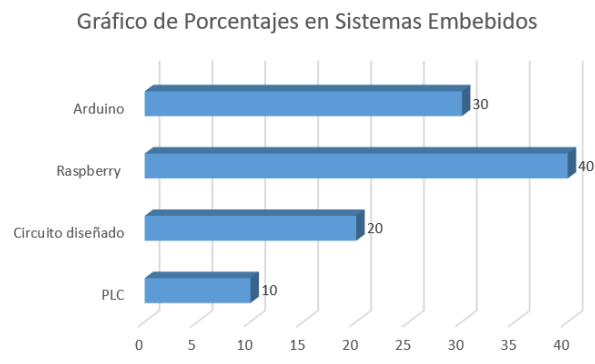
Sistemas embebidos usados

Figura 34.



Como podemos observar la clara tendencia a nivel internacional es hacia el uso de Arduino con uno 42%, Raspberry y Lattepanda (con 17% cada uno). También hay otros sistemas embebidos usados en aplicaciones IoT importantes, como Orange Pi (8%), Wemos D1 Mini (8%) o la placa Nodemcu (8%).

Figura 35



En la figura 35, podemos observar que en Colombia la tendencia es hacia el uso de Raspberry y Arduino con 40% y 30% de proyectos que lo usan. Pero el 30% restante lo ocupan circuitos con placas diseñadas específicamente para el proyecto (20%) y un 10% haciendo uso de PLC (controladores lógicos programables). Es claro entonces que el uso de Arduino y Raspberry es una clara tendencia en todos los proyectos a nivel nacional e internacional.

Se encontró que el uso frecuente de Arduino en aplicaciones IoT a la versatilidad que provee esta placa para poder extender sus funciones a través de las tarjetas de expansión que permiten su integración con otras placas, como por ejemplo Raspberry; esto permite una ampliación en la posibilidad de comunicación de la capa de red y abarca una gran cantidad de opciones para la transferencia de datos desde los sensores.

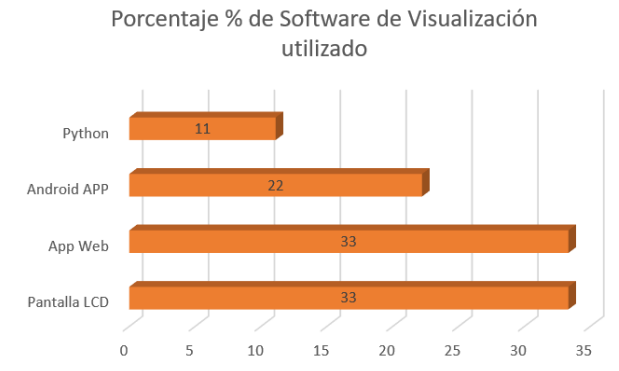
Por su parte, el uso frecuente de Raspberry obedece a que posee un sistema operativo basado en Linux, por lo tanto, permite la implementación de servidores web y alojamiento de bases de datos para la manipulación de información. Adicional está la opción de implementaciones gráficas, y realización de programación de alto nivel. Esto posiciona a esta tarjeta como una herramienta muy útil, cuando se requieren aplicaciones más complejas con interfaces de usuario.

Pero en los proyectos internacionales también tienen más alternativas que son bastante usadas como Orange Pi, o Latte Panda, las cuales también es importante que sean tenidas en cuenta a nivel nacional en implementaciones de IoT para cultivos hidropónicos y aeropónicos.

Software de visualización utilizado

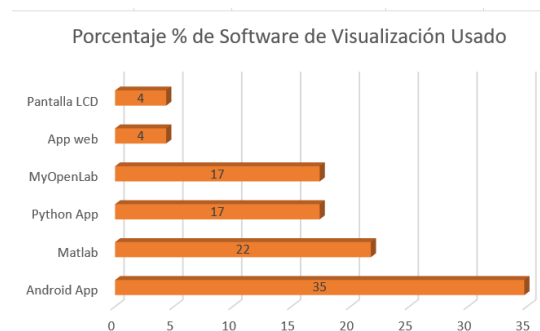
Figura 36

Porcentaje de Software de Visualización Utilizado a nivel Internacional



Vemos que a nivel internacional la tendencia es a visualizar los datos y las interfaces de control a través de aplicaciones web (33%) o directamente sobre pantallas LCD para su visualización inmediata. Luego siguen las aplicaciones que hace uso de Android y Python con un 22 % y 11% respectivamente.

Figura 37



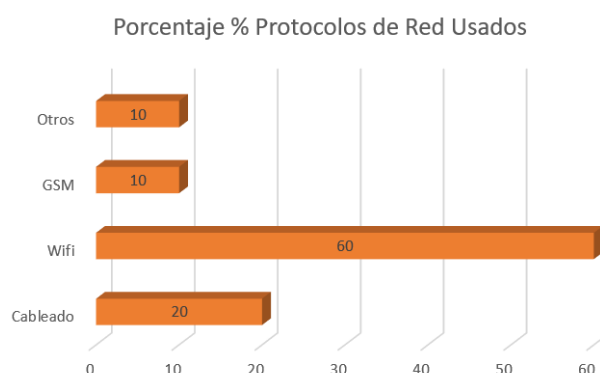
En cuanto a nivel nacional, la tendencia es hacia el uso de aplicaciones Android, gracias a su facilidad de manejo, y portabilidad, lo cual llama bastante la atención. Tenemos también un fuerte porcentaje de uso de Python (17%) y Matlab (22%) para la visualización de datos, usados en proyectos donde se implementaron herramientas de software importante. Por último, tenemos algunas implementaciones de IoT con pantalla LCD y App Web, con un 4% cada una de ellas.

6.2.2 Capa de red

En esta capa de los 28 trabajos estudiados se revisan las redes y protocolos que permiten la comunicación de los datos mediante la interacción y convergencia tecnológica. Esto incluye todos los protocolos y medios de red que se han ido integrado gradualmente a las tecnologías IoT.

Protocolos de red IoT más usados en aplicaciones de aeroponía e hidroponía

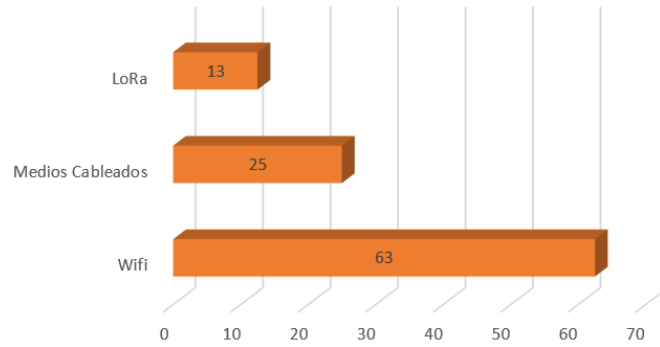
Figura 38.



A nivel internacional la tendencia fuerte es hacia el uso de Wifi con un 60%, ya que es el protocolo más conocido que permite la interconexión de dispositivos del hogar, y es ampliamente usado en aplicaciones IoT. Le siguen medios cableados, GSM que es un protocolo de comunicación para telefonía celular también utilizado fuertemente en proyectos IoT en agricultura de precisión.

Figura 39

Porcentaje % de Protocolos de Red Usados



Vemos que Wifi En Colombia es el protocolo de red más usado, con un 63% seguido de medios cableados y LoRa que empieza a tener un buen porcentaje de integración en nuestro país con un 13%.

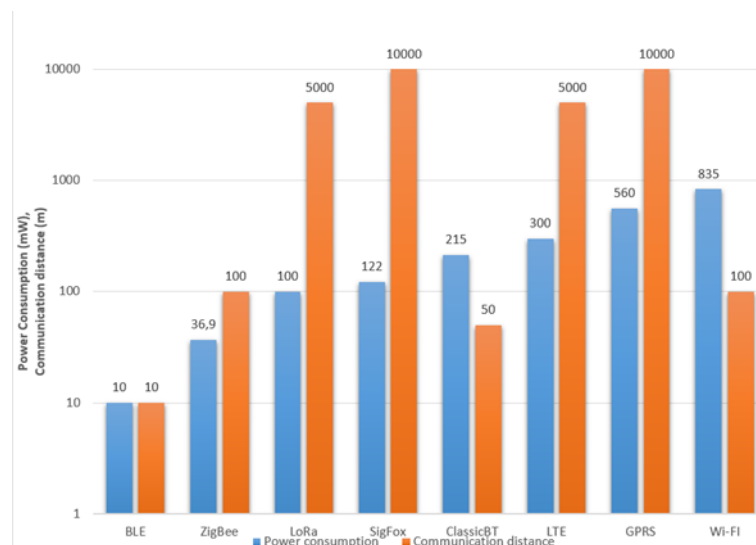
8. TRABAJOS FUTUROS Y CAMPO DE ACCIÓN

Existen problemas y desafíos que necesitan ser abordados en la agricultura inteligente aplicados a cultivos aeropónicos e hidropónicos. Estos problemas pasan por el hardware, infraestructura, interferencia de señal, seguridad de los datos y organización (Kassim M. , 2020). A continuación, se mencionan algunos de ellos:

- **El consumo de energía.** El área de cobertura de los dispositivos inteligentes hace indispensable su uso en las soluciones agrícolas, pero por ende es necesario aumentar su vida útil. Para lograrlo se puede optimizar el uso de la energía a través celdas solares, sensores de bajo consumo, y energía inteligente a través de algoritmos de gestión eficientes.

Figura 40

Gráfico comparativo de tecnologías inalámbricas, potencia versus distancia.



Nota: Adaptado de (Kassim M. , 2020)

El consumo energético depende en gran medida de los protocolos de comunicación usados en las aplicaciones agrícolas. En el gráfico anterior podemos ver los protocolos y la potencia de consumo de cada uno de ellos. Zigbee maneja niveles de 36,9 mW de consumo con una distancia de 100 metros, LoRa consume 100 mW teniendo un alcance de 5 km, y por su parte Sigfox consumiendo 122 mW puede alcanzar 10 km. Esto hace que estas tres tecnologías inalámbricas sean muy adecuadas para agricultura y sus aplicaciones gracias a su baja potencia y largo alcance de consumo y comunicación; esto facilita enormemente los desarrollos y sistemas implementados en el ámbito agrícola.

- **Hardware.** En este punto es vital obtener un diseño IoT adecuado que pueda hacer uso de estándares como el IP67 sobre todo para dispositivos que se usan en campo abierto. (Asikainen, Haataja, & Toivanen, 2013). IP en este contexto hace referencia al nivel de protección ante los elementos sólidos como polvo y arena. El nivel puede variar desde 0 (sin ninguna protección) hasta 6 (total protección). El segundo número especifica la resistencia al agua en un rango de 0 al 8. (digitaltoo, 2019)

- **Redes.** Debido al alto costo del cableado y plataformas la comunicación inalámbrica es altamente usada en despliegues de agricultura inteligente. Pero las señales de los dispositivos tienden a debilitarse debido a los numerosos obstáculos existentes en campo. Por lo tanto, debe hacerse uso de redes fiables, robustas y confiables que permitan transferir datos. (Ojha, Misra, & Raghuwanshi, 2015)

- **Infraestructura.** La infraestructura IoT aplicada a los entornos agrícolas es más complicada que en otras aplicaciones. Esto se debe a que se necesita de apoyo en tiempo real continuo. El enfoque orientado a I servicio (SOA) es considerado como el más adecuado, además de esto existen frameworks y herramientas de código abierto que están disponibles para los agricultores y de esta manera darles la asequibilidad requerida. (Anish, Kendra, Craig, Lu, & Sweeney, 2020)
- **Señal de la comunicación.** En áreas rurales remotas, y sobre todo en los países en desarrollo, la conectividad a través de internet fuerte y robusta, no está disponible. Si no se implementa una infraestructura de red mejorada la agricultura inteligente continuará siendo un problema. (Shiva, Vikas, Amit, & Hemant, 2019)
- **Fiabilidad y escalabilidad.** En la agricultura inteligente muchos dispositivos son implementados en campo abierto con estrictas condiciones ambientales, por lo tanto, los impactos externos hacen que los dispositivos no se comuniquen y sean incapaces de enviar datos al servidor o la nube. Esto ha generado que salgan al mercado cada vez más cantidad de Gateway que admitan más dispositivos IoT y mayores aplicaciones.
- **Conciencia y conocimiento.** La gran mayoría de la población rural tiene pocos niveles de educación y por ende desconocen los beneficios de IoT, y sus aplicaciones. Este es el principal obstáculo para el despliegue de IoT en zonas rurales. Es importante ayudar al agricultor, concientizándole sobre las

tecnologías IoT y cómo éstas pueden ayudarlo a administrar mejor y más eficientemente sus cultivos al tiempo que aumenta su productividad e ingresos.

- **Seguridad de los datos.** Gran cantidad de los dispositivos existentes de IoT no están diseñados pensando en seguridad y privacidad. Por lo tanto, surgen problemas derivados de la integridad, autenticación, control de acceso, entre otros. Estos dispositivos transmiten millones de datos día a día y por ende garantizar su seguridad es vital a nivel de todas las capas de la red IoT. (Gupta, 2020)

- **Procesos de negocio.** Todas las cadenas de valor en las organizaciones alimentarias y los sectores agrícolas tienen que ser rediseñadas y esto creará un cambio importantísimo en el negocio de productos agrícolas para los minoristas y clientes. Debido a lo anterior los agricultores deben equiparse en conocimiento (plataformas de comercio, manejo básico de dispositivos, etc.) y los recursos para gestionar estos nuevos retos.

CONCLUSIONES

La investigación realizada demuestra que la solución a los problemas de hambre en el mundo actual y futuro pasa por la urgente necesidad de integrar tecnologías de internet de las cosas a las metodologías y formas en que cultivamos; y es en ese contexto donde IoT ha permitido la rápida y eficiente expansión de los cultivos aeropónicos e hidropónicos a nivel nacional e internacional, siendo hoy por hoy pieza fundamental dentro de investigaciones académicas, políticas de empresas, planes de gobierno y desarrollos científicos.

También esta investigación ha evidenciado la importancia que los protocolos de comunicación inalámbricos están cobrando en IoT dentro de cultivos aeropónicos e hidropónicos. Wifi, GSM, LoRA entre otros, son protocolos de fácil implementación en este tipo de cultivos y que de la mano de los sistemas embebidos como Raspberry Pi, Arduino o Latte Panda permiten un rápido despliegue de redes de sensores y actuadores que envían sus datos a través de los protocolos a los sistemas embebidos o servidores en la nube para su procesamiento y visualización. Entre los softwares más usados para esto están los soportados en lenguaje Python, Android y aplicaciones web.

Lo anterior propicia el rápido desarrollo de los sistemas de control y monitoreo, lo que redundará en mejores producciones de alimentos, más saludables, y a menor costo, todo esto gracias a varios factores importantes, los cuales fueron encontrados en la elaboración del estado del arte:

- Disminución de temperatura en cámara radicular. Se encontraron casos en que los sistemas aeropónicos e hidropónicos automatizados realizaron

disminuciones en la temperatura de 32.9° grados en ambiente a 28° grados en la cámara radicular del sistema.

- Mayor producción que los métodos tradicionales. Los sistemas aeropónicos e hidropónicos apoyados en tecnologías produjeron más tubérculos que el cultivo tradicional.

- Mejoras en el ambiente de las plantas. Se encontró que gracias a los dispositivos tecnológicos mecanizados se mejoró el ambiente de las plantas y con ello se generan mejores rendimientos y calidad de cosechas.

- Mayor crecimiento las plantas. En algunos proyectos se encontró que los sistemas aeropónicos e hidropónicos mejoraron el crecimiento de los tallos adicionando hasta 10 cm, y duplicando el tamaño de las raíces de las plantas al cabo de tres semanas en comparación con el mismo tiempo para los cultivos en tierra.

- Mayor precisión en mediciones. Se encontró en algunos casos el sistema inteligente generó una precisión del 98% en comparación a la medición manual de pH, temperatura y TDS.

- Reducción de uso de pesticidas y riesgos fitopatológicos. Esto redundó en mejoras en los costos en uso de plaguicidas, el número de trabajadores que se requieren, y producción de alimentos más limpios y sanos.

Por último, es importante recalcar que actualmente se trabaja con fuerza en el mejoramiento de la comunicación en las redes de los cultivos, el hardware usado, la infraestructura, seguridad de los datos y la conciencia ciudadana de la importancia de este tipo de cultivos. Ya que conforme avanza la tecnología, nuevos retos y necesidades deben ser cubiertos, siendo las áreas antes mencionadas el enfoque

actual en las diferentes tecnologías del internet de las cosas aplicado a cultivos aeropónicos e hidropónicos en el plano nacional e internacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Anish, P., Kendra, L., Craig, J., Lu, & Sweeney, D. (2020). A Review of Practice and Implementation of the Internet of Things (IoT) for Smallholder Agriculture. *Sustainability*.
- Ashton, K. (2009). That 'Internet of Things' Thing. *RFID Journal*.
- Asikainen, M., Haataja, K., & Toivanen, P. (2013). Wireless indoor tracking of livestock for behavioral analysis. *Proceedings of 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*.
- Barker, B. (1922). Studies on root development. *Long Ashton Res. Station Ann.Rep*, 9–57.
- Bauer, J., & Aschenbruck, N. (2018). Design and implementation of an agricultural monitoring system for smart farming. *IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany)*.
- Belista, F., Patrick, M., Luceñara, L., Policarpio, C., Tan, X., & Baldovino, R. (2018). A Smart Aeroponic Tailored for IoT Vertical Agriculture using Network Connected Modular Environmental Chambers. *Departmetn Gokongwei College of Engineering, De La Salle University*.
- Beltrano, J., & Daniel, G. (2015). *CULTIVO EN HIDROPONÍA*. Buenos Aires: UNIP.
- Bismart. (2019). *Los objetos de internet de las cosas más antiguos del mundo*. Obtenido de Blog Bismart: <https://blog.bismart.com/es/objetos-iot-mas-antiguos>
- Briceño, M., & Cubides, W. (2020). DISEÑO DE UNA SOLUCIÓN IOT PARA MONITOREO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE FLORES EN INVERNADERO. *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA FACULTAD DE INGENIERÍAS*.
- Cama, A., Hoz, E., & Cama, D. (2012). Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas. *INGE CUC*, 163-172.
- Cambra, C., Sendra, S., Lloret, J., & Garcia, L. (2017). An IoT service-oriented system for agriculture monitoring". *International Conference on Communications*.
- Camelo, E., Tapias, J., & Carvajal, G. (2019). Prototipo Aeropónico Automatizado: un Camino hacia la Producción Agrícola y Desarrollo Sostenible. En U. Libre, *AVANCES Y PERSPECTIVAS DE LA INGENIERÍA 4.0* (págs. 113-131). Ibagué: Universidad Libre de Colombia.
- Carvajal, G. (2019). Diseño e implementación de un sistema de control de riego para prototipo automatizado de cultivos aeropónicos de cilantro. *Universidad nacional abierta y a distancia – UNAD Escuela de ciencias básicas, tecnologías e ingenierías*.
- CEPAL, FAO & IICA. (2021). *PERSPECTIVAS DE LA AGRICULTURA Y DEL DESARROLLO RURAL EN LAS AMÉRICAS*. ©Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), ©Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), ©Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2021.
- College of Arts and Science Yangtze University. (2016). The Research of IOT of Agriculture based on Three Layers Architecture. *2nd International Conference on Cloud Computing and Internet of Things (CCIOT)*.

- Cotes, Y., & Jiménez, Y. (2009). *Descripción del Proceso de Implementación de la Política de Seguridad Alimentaria y Nutricional en el Departamento de la Guajira*. Bogotá: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Cruz, M., Oliete, P., Morales, C., González, C., Cendón, M., & Hernández, A. (2015). *Las tecnologías IoT dentro de la industria conectada*. Madrid: pwc.
- DANE. (2021). *PROYECCIONES DE POBLACIÓN NACIONAL POR ÁREA 2005-2017*. Bogotá: DANE.
- Delgado, P. (05 de Septiembre de 2015). Los 10 problemas que le restan capacidad al agro. *La República*.
- Dholu, M., & Ghodinde, K. (2018). Internet of Things (IoT) for Precision Agriculture. *2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI 2018)*.
- digitaltoo. (2019). ¿QUÉ SIGNIFICA IP67? Obtenido de www.digitaltoo.com: <https://www.digitaltoo.com/2020/02/17/que-significa-ip67-te-lo-explicamos/>
- Evans, D. (2011). *Internet de las cosas Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*. IBSG.
- Evans, D. (2021). Internet de las cosas Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. *Cisco Systems*.
- FAO. (2017). EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura*.
- Farmathand. (Octubre de 2021). *Make Farm Management Easier*. Obtenido de Farmathand: <http://www.farmathand.com>
- FarmOs. (Octubre de 2021). *Farm OS User Guide*. Obtenido de FarmOs: <http://www.farmos.org>
- Farmrexx. (Octubre de 2021). *www.farmrexx.com*. Obtenido de www.farmrexx.com.
- Farran, I., & Mingo-castel, E. (2006). Potato minituber production using aeroponics: Effects of density and harvest. *Am. J. Potato Res.* 83, 47-53.
- Forero, R., Parra, H., Luna, R., & Rivera, E. (2011). Agricultura urbana: Sistemas de implementación de cultivos hidropónicos. *Uniamérica*.
- Gericke, W. (1940). *The Complete Guide To Soilless Gardening*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Gimenez, D., & José, B. (S.F). *Cultivo en hidroponía*. La Plata: Universidad de la Plata.
- Gimeno, L. (2016). Agricultura hidropónica, una opción ecológica y sostenible de la mano de la tecnología. *Radio Canadá Internacional (RCI)*.
- Giraldo, A. (2020). Tan cerca y tan lejos de la agricultura 4.0 en Colombia. *UNIVERSIDAD EAFIT - AGROTECH: TRANSFORMACIÓN, MERCADO Y PRODUCCIÓN*.
- Gobierno de Colombia. (2018). *Plan Nacional de Desarrollo*. Bogotá: Gobierno Nacional.
- Gobierno de Colombia. (2018). *Plan TIC 2018-2022*. Bogotá: Gobierno Nacional.
- Gobierno de México. (2019). *El cultivo hidropónico, alternativa para combatir la pobreza y evitar el daño ambiental*. Obtenido de Comunicación senado: <http://comunicacion.senado.gob.mx/index.php/informacion/boletines/46263-el-cultivo-hidroponico-alternativa-para-combatir-la-pobreza-y-evitar-el-dano-ambiental.html>
- Gopinath, P., Vethamoni, I., & Gomathi, M. (2017). Aeroponics Soilless Cultivation System for Vegetable Crops. *Chemical Science Review and Letters*, 838-849.

- GroHo. (2020). *La Historia de la Hidroponía*. Obtenido de GroHo.es: <https://www.groho.es/post/la-historia-de-la-hidroponia>
- Gupta, M. (2020). Security and Privacy in Smart Farming: Challenges and Oportunities. *IEEE Access*, Vol.8.
- Hernández, J. (1987). *Cultivos hidropónicos*. Bogotá: Universidad Agraria.
- Hisang-Jen, H., & Chung-Chih, L. (2019). Intelligent Medicinal Plant Factory. *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris)*.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. L. (1938). The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil. *California Agricultural Experimented Station*.
- Hoyos, F., Candelo, J., & Chavarría, H. (2018). Automatización de cultivos aeropónicos de cilantro libres de pesticidas. *INGE CUC*, vol. 15, 123-132.
- IBIS World. (2016). *Hydroponic Crop Farming: Market Research Report*. Washigton: IBIS World.
- Idris, I., & Ikhsan, M. (2012). Monitoring and Control of Aeroponic Growing System for Potato Production. *IEEE Conference on Control, Systems and Industrial Informatics (ICCSII)*, 23-26.
- Ikhsan, M., Siregar, S., Pujud, A., & Jauhari, R. (2016). Web-Based Monitoring and Control System for Aeroponics Growing Chamber. *International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*.
- Intagri. (2017). *La Hidroponía: Cultivos sin Suelo*. Obtenido de Intagri: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>
- Jamhari, C., & Annisa, A. (2020). Design and Implementation of IoT System for Aeroponic Chamber Temperature Monitoring. *The third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering*.
- Kang, J., Kim, Y., Om, Y., & Kim, J. (1996). Growth and tuberization of potato (*Solanum tuberosum* L.). *J. Korean Soc. Hort. Sci.*37, 24-27.
- Karuniawati, S., Putrada, G., & Rakhmatsyah, A. (2018). Optimización del control de luces de crecimiento en IoT Sistemas aeropónicos con Sensor Fusion y Clasificación aleatoria de bosques. *Escuela de Computación Universidad Telkom*.
- Kassim, M. (2020). IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges. *IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*.
- Kassim, M., Mat, I., & Yussoff, I. (2019). Applications of Internet of Things in Mushroom Farm Management. *Proceedings of 13th International Conference on Sensing Technology*.
- Kennedy, J. (1926). When Woman is Boss, interview with Nikola Tesla. *Colliers*.
- Lakkireddy, K. R., Kasturi, K., & Sambasiva Rao, K. S. (2012). Role of Hydroponics and Aeroponics in Soilless Culture in Commercial Food Production. *Volumen 1 STM Journals*, 26-35.
- Llorente, M. (2020). *Cultivos hidropónicos y aeropónicos, la digitalización de la agricultura*. Obtenido de ainia: <https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/cultivos-hidroponicos-aeroponicos-digitalizacion-agricultura/>
- Martínez, G. (2019). *Red de sensores para localización basada en LoRa y FIWARE*. Sevilla: Escuela técnica superior de ingeniería.

- Mbiyu, M., Muthoni, J., Kabira, J., Elmar, G., Muchira, C., Pwaipwai, P., . . . Onditi, J. (2012). Use of aeroponics technique for potato (*Solanum tuberosum*) minitubers production in Kenya. *Journal of Horticulture and Forestry*, 172-177.
- Medela, A., Cendón, B., González, L., Crespo, R., & Nevares, I. (2013). IoT multiplatform networking to monitor and control wineries and vineyards. *Future Network & Mobile Summit*, 1-10.
- Medellín, P. (24 de Mayo de 2021). *Mientras 2.7 millones de colombianos sufren hambre, 10 millones de toneladas de alimentos se desperdician anualmente*. Obtenido de Instituto de Estudios Urbanos - IEU: <http://ieu.unal.edu.co/medios/noticias-del-ieu/item/mientras-2-7-millones-de-colombianos-sufren-hambre-10-millones-de-toneladas-de-alimentos-se-desperdician-anualmente>
- Medina, S., Armando, G., & Tinetti, F. (2018). Análisis para despliegue de una red de sensores heterogénea. *Congreso Argentino de ciencias de la computación*.
- MinAgricultura de Colombia. (2015). El PECTIA la gran herramienta para definir las líneas de acción y la toma de decisiones de la agroindustria nacional. *Ministerio de Agricultura Nacional*.
- Ministerio de agricultura Colombia. (2006). Gestión ambiental en el sector agropecuario. *Ministerio de agricultura y desarrollo rural*.
- MinTIC. (2018). *TIC en el sector agrícola*. Obtenido de MinTic: <https://mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-article-19492.html>
- Mora, M., & Urrego, K. (2018). *Monografía internet de las cosas: modelos de comunicación, desafíos y aplicaciones*. Villavicencio: Universidad de los Llanos.
- Muhammad, I., Rizalul, M., & Rosmiati, M. (2021). Monitoring And Controlling Smart Hidroponics Using Android and Web Application. *3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology*.
- Naville, E. (1913). The Temple of Deir el-Bahari. *London: Memoirs of the Egypt Exploration Fund. Vol 16*, 12-17.
- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and electronics in agriculture*.
- ONU. (2021). *17 objetivos para transformar nuestro mundo*. Obtenido de www.un.org: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Parra, J., Guerrero, C., & Rico, D. (2017). IOT: UNA APROXIMACION DESDE CIUDAD INTELIGENTE A UNIVERSIDAD INTELIGENTE. *INGENIO UFPSO*, 1-12.
- Parra, J., Guerrero, C., & Rico, D. (2017). IOT: una aproximación desde ciudad inteligente a universidad inteligente. *Revista Ingenio UFPSO*, Vol 13.
- Plazas, M. (2020). ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL MONITOREO REMOTO DE VARIABLES DE UN CULTIVO VERTICAL A TRAVÉS DE UNA PLATAFORMA IOT. *Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Universidad de Antioquia*.
- Pochai, M., Sirijaturaporn, P., Jongjittanon, N., & Pimnoo, A. (2018). An Aeroponic Technology for Microgravity Plant Experiments on Earth. *15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*.
- Porfatolio. (12 de Febrero de 2019). Las tecnologías que podrán 'salvar' el agro colombiano. *Portafolio*.

- Puranik, V., Sharmila, Ranjan, A., & Kumari, A. (2019). Automation in Agriculture and IoT . *College Ghaziabad 978-1-7281-1253-4/19/\$31.00 © 2019 IEEE.*
- Quiroga, A., Jaramillo, S., Campo, Y., & Chanchí, E. (2017). Propuesta de una Arquitectura para Agricultura de Precisión Soportada en IoT. *Risti*, 39-57.
- Rahmad, I., Tanti, L., Puspasari, R., Ekadiansyah, E., & Fragastia, V. (2020). Automatic Monitoring and Control System in Aeroponic Plant Agriculture . *El 8th Conferencia Internacional sobre Gestión de Servicios Cibernéticos y de TI.*
- Rawidean, M. (2020). IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges. *2020 IEEE Conference on Open Systems (ICOS).*
- Resh, H. (1998). *Hydroponic food production definitive guidebook for the advanced home garden and commercial hydroponic grower.* Santa Bárbara: Woodbridge.
- Rodríguez, E., & López, V. (2017). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA UN EDIFICIO MEDIANTE IOT UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN LORAWAN* . Bogotá: Universidad distrital Francisco José de Caldas.
- Román, J. L. (s.F). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. *coddinforme.*
- Rosas, A. (2009). *Cartilla hidropónica: Cultivos hidropónicos.* Bogotá: MAFPAC impresores.
- Ruengittinun, S., Phongsamsuan, S., & Sureeratanakorn, P. (2017). Applied internet of thing for smart hydroponic farming ecosystem. *IEEE.*
- Salazar, G. (27 de Mayo de 2001). *HISTORIA DE LA HIDROPONIA Y DE LA NUTRICION VEGETAL.* Obtenido de drcalderonlabs.com:
http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Historia_de_la_Hidroponia/Historia_de_la_Hidroponia.htm
- Salazar, J., & Silvestre, S. (2016). Internet de las cosas. *Techpedia.*
- Salazar, J., & Silvestre, S. (2020). *Internet de las cosas.* Praga: European Virtual Learning Platform for Electrical and Information Engineering Techpedia.
- Santos, J., & Lizcano, J. (2020). Automatización de la producción de Forraje Verde Hidropónico y Abono-Orgánico en la Granja Cunicola Autosustentable en el Municipio de Mutiscua Colombia . *Revista Iberica de Sistemas e Tecnologías de Informacao.*
- Shiva, J., Vikas, B., Amit, A., & Hemant, A. (2019). Internet of Things (IoT) For Smart Agriculture And Farming In Developing Nations. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 8(12) 8(12) 1049-1056.
- Sholto, J. (1987). *Hidroponía: cómo cultivar sin.* Bogotá: El Ateneo.
- Silvestre, S., & Salazar, J. (2019). El mundo Internet of Things (IoT). *Erasmus +.*
- Sivamani, S., Bae, N., & Cho, Y. (2013). A Smart Service Model Based on Ubiquitous Sensor Networks Using Vertical Farm Ontology. *International Journal of Distributed Sensor Networks. Sagepub Journal.*
- SPINOFF, N. (2006). *Progressive Plant Growing Has Business Blooming.* Obtenido de NASA SPINOFF: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/er_2.html
- T.Liu, A., Janku, A., & Pietz, D. (2018). Landscape Change and Resource Utilization in East Asia: Perspectives from En-vironmental History. *Academia Sinica on East Asia and Academia Sinica Taiwan, london, UK: Routledge.*
- Tambero. (octubre de 2021). *Software gratuito de gestión agrícola.* Obtenido de Tambero: <http://www.tambero.com>
- Tania. (Octubre de 2021). *Overview of Tania.* Obtenido de Tania: <http://www.usetania.org>

- Triana, J., & Rodríguez, R. (2018). *Prototipo de solución IoT con tecnología "LoRa" en un monitoreo de cultivos agrícolas*. Bogotá: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS .
- Trimble. (Octubre de 2021). *Agriculture Intelligence in your hands*. Obtenido de Trimble: <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9293672&tag=1>
- Turing, A. (1950). Computing Machinery And Intelligence . *Oxford Mind Journal*, 433-460.
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 31-48.
- Urrego, A. (2021). *LOS OBSTÁCULOS DE IMPLEMENTAR SISTEMAS DE CULTIVOS HIDROPÓNICOS EN COLOMBIA*. Obtenido de Agronegocios - La República: <https://www.agronegocios.co/agricultura/los-obstaculos-de-implementar-sistemas-de-cultivos-hidroponicos-en-colombia-3137958>
- Urrestarazu, G. (2004). Tratado de cultivo sin suelo. *España*.
- Villarroel, C., Goykovic, V., Caiconte, C., & Barraza, M. (2019). EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UN INVERNADERO UBICADO EN EL DESIERTO DE ATACAMA, CHILE, A TRAVÉS DE IoT. *Asociación Interciencia Venezuela*, 386-393.