

### UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA HABANA JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA “CUJAE”

**FACULTAD DE INGENIERÍA AUTOMÁTICA Y BIOMÉDICA**

**Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero en Automática.**

# “Diseño e implementación del hardware para la estación meteorológica vórtice.”

Autor

Alex Manuel Rivera Rivera

 [https://orcid.org/0000-](https://orcid.org/0000-0000-0000-0000)0002-2054-9645

Tutores

Ing. Orestes Chávez Linares

Dra. Ivón Oristela Benítez

La Habana, 2023.

1. Revisión Bibliográfica

## Introducción

Las estaciones meteorológicas de bajo costo son una alternativa para los agricultores que desean monitorear las condiciones climáticas en sus cultivos. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) cuenta con una red de 1,016 estaciones agro meteorológicas disponibles en línea, y es la única cuyo enfoque es totalmente dirigido a auxiliar al sector agrícola(1,2). Sin embargo, no todas las estaciones están siempre en las mejores condiciones operativas, y la dependencia tecnológica de México también se observa en el ámbito de la meteorología(1).

Investigadores del INIFAP y del Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL) han desarrollado una estación meteorológica de bajo costo para su uso en investigaciones enfocadas a incrementar la productividad agrícola(2). La estación utiliza una Raspberry Pi y sensores para monitorear la temperatura, humedad y pH del entorno(3). La implementación de esta estación es una alternativa para asegurar estudios meteorológicos de calidad a costos inferiores(3).

Otra investigación realizada en Nuevo León, México, encontró que el 50% de las 38 estaciones meteorológicas automatizadas existentes en la región funcionan de forma correcta, mientras que se desconoce el estado del resto de las estaciones(2). La implementación de estaciones meteorológicas de bajo costo puede ser una solución para los agricultores que no tienen acceso a estaciones meteorológicas de alta calidad o que no pueden permitirse el costo de las mismas(3).

## La agricultura Inteligente

La agricultura inteligente es un enfoque integrado para la gestión de los paisajes que aborda dos desafíos interrelacionados: la seguridad alimentaria y el cambio climático(4). La agricultura inteligente busca conciliar la gestión agrícola con las tecnologías de datos, con el fin de optimizar los sistemas complejos y las dinámicas volátiles de la agricultura(5). La agricultura inteligente es parte de un paraguas de revoluciones que forman parte de la Agricultura 4.0 y la Agricultura 5.0, como la agricultura digital y la agricultura de precisión(5).

La agricultura climáticamente inteligente (CSA) es un enfoque que ayuda a orientar las acciones necesarias para transformar y reorientar los sistemas agrícolas a fin de apoyar de forma eficaz el desarrollo y garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante(6). La CSA persigue tres objetivos principales: el aumento sostenible de la productividad y los ingresos agrícolas, la adaptación y la creación de resiliencia ante el cambio climático y la reducción y/o absorción de gases de efecto invernadero(6). La CSA provee los medios para ayudar a las partes interesadas a identificar, en los niveles local, nacional e internacional, estrategias agrícolas acordes con las condiciones de cada lugar(6).

En América Latina, los sistemas agrícolas y alimentarios son reconocidos como uno de los más exitosos del planeta(7). Sin embargo, la agricultura en la región enfrenta desafíos como la necesidad de producir más alimentos para alimentar a una

población en rápido crecimiento, la vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático y la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos

naturales(7). La agricultura inteligente y la CSA ofrecen oportunidades para abordar estos desafíos, permitiendo un uso intensivo y eficiente de los recursos, alta productividad y baja huella ambiental(4,6).

### Tecnologías Agrícolas Inteligentes

La innovación agrícola y la tecnología son fundamentales para eliminar la pobreza, satisfacer la creciente demanda de alimentos y hacer frente a los efectos adversos del cambio climático(8). Los países en desarrollo deben aumentar de forma drástica la innovación agrícola y el uso de la tecnología por parte de los agricultores(8). La inversión en investigación y desarrollo agrícola es esencial para aumentar la productividad en el sector agrícola, generar más y mejores empleos, y permitir que más personas se trasladen del campo a las ciudades en busca de nuevas oportunidades(8).

Las tecnologías agrícolas inteligentes pueden ayudar a los agricultores a mejorar la producción, mejorar la calidad de sus productos, conservar los recursos naturales y adaptarse a los desafíos climáticos(8). La agricultura climáticamente inteligente (CSA) es un enfoque que ayuda a orientar las acciones necesarias para transformar y reorientar los sistemas agrícolas a fin de apoyar de forma eficaz el desarrollo y garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante(6). La CSA persigue tres objetivos principales: el aumento sostenible de la productividad y los ingresos agrícolas, la adaptación y la creación de resiliencia ante el cambio climático y la reducción y/o absorción de gases de efecto invernadero(6).

Las tecnologías digitales pueden ayudar a los agricultores a entregar sus productos a los consumidores, lo que fue especialmente crucial durante la pandemia de COVID-19(9). Además, las tecnologías ambientales, como la conservación del agua y el suelo, la agro silvicultura y las cocinas que ahorran energía, pueden ayudar a proteger el medio ambiente(9). Las prácticas agrícolas climáticamente inteligentes pueden ayudar a reducir de forma sustancial las emisiones de gases de efecto invernadero de origen pecuario(10). Los recursos naturales, como la tierra, el agua, el suelo y la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, pueden ser optimizados y fortalecidos mediante el uso de técnicas nucleares.

### Beneficios de la Agricultura Inteligente

[La agricultura inteligente es un enfoque que utiliza tecnologías avanzadas para optimizar la productividad agrícola sin agotar los recursos naturales disponibles(5). La agricultura inteligente es parte de la Agricultura 4.0 y la Agricultura 5.0, como la agricultura digital y la agricultura de precisión(5). La agricultura inteligente permite a los agricultores capturar datos en profundidad sobre la plantación, posibilitando un mejor seguimiento, monitoreo, automatización y análisis de las operaciones(5).](#_bookmark211)

La agricultura inteligente tiene varios beneficios. En primer lugar, la agricultura inteligente puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de origen pecuario(10). En segundo lugar, la agricultura inteligente puede aumentar de forma sostenible la productividad y los ingresos agrícolas(6). En tercer lugar, la agricultura inteligente puede ayudar a los agricultores a adaptarse al cambio climático(6). En cuarto lugar, la agricultura inteligente puede mejorar la preservación de los recursos naturales(10).

Para implementar la agricultura inteligente, es necesario utilizar dispositivos, sistemas y recursos tecnológicos para capturar datos en profundidad sobre la plantación(5). Es esencial poder integrar todo en un ecosistema de información eficiente(5). Un software eficaz, que sea a la vez flexible y robusto, es esencial para que pueda aprovechar todo el potencial informativo de la agricultura inteligente(5). Además, los agricultores necesitan ayuda para idear prácticas agrícolas climáticamente inteligentes que puedan adaptarse a los efectos del cambio climático y mitigarlos(10).

### La Agricultura Inteligente Como Alternativa

La agricultura inteligente es una alternativa para el futuro de la agricultura que utiliza tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción agrícola. La agricultura inteligente incluye prácticas como la agricultura de precisión, la reutilización del agua, la bioenergía y el biofertilizante, y la digitalización climáticamente inteligente(7). Estas prácticas permiten un uso intensivo y eficiente de los recursos, alta productividad y baja huella ambiental, y aumento de los recursos naturales de los cuales depende la agricultura(7).

La agricultura inteligente también puede ayudar a mitigar y adaptarse al cambio climático, que es uno de los mayores desafíos que enfrenta la agricultura en la actualidad(4). La agricultura climáticamente inteligente (CSA) es un enfoque que ayuda a las personas que manejan los sistemas agrícolas a responder de forma eficaz al cambio climático(6). El enfoque de la CSA persigue el triple objetivo de aumentar de forma sostenible la productividad y los ingresos agrícolas, adaptarse y crear resiliencia al cambio climático, y reducir o eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero(6).

La agricultura inteligente también puede ayudar a los pequeños productores, que son la columna vertebral de la industria agrícola(11). La información satelital, por ejemplo, permite medir la evolución de un cultivo durante la campaña, configurar sistemas de alertas y transferir correctamente un informe de riesgo a los mercados capitales(11). Además, la agricultura inteligente puede ayudar a reducir la huella ecológica de la agricultura corrigiendo algunos de sus sistemas de producción(11).

En resumen, la agricultura inteligente es una alternativa prometedora para el futuro de la agricultura. Utiliza tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción agrícola, y puede ayudar a mitigar y adaptarse al cambio climático.

## Principales indicadores agroambientales en la agricultura de precisión

En la agricultura de precisión, se utilizan varios indicadores agroambientales para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas en el medio ambiente y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales(12). El Compendio de la OCDE de Indicadores Agroambientales es una fuente importante de información sobre los indicadores agroambientales(13). Algunos de los indicadores agroambientales que se utilizan en la agricultura de precisión son:

* Índice de sostenibilidad ambiental (ISA): este índice evalúa la calidad del medio ambiente y la sostenibilidad de las prácticas agrícolas. Incluye variables como las emisiones y concentración de agentes contaminantes, el uso de agroquímicos, la calidad y el volumen de aguas, y el crecimiento de la población(14).
* Índice de planeta vivo (LPI): este índice mide la biodiversidad y la salud del planeta. Evalúa la diversidad de especies, la abundancia de especies, la distribución geográfica de las especies y la salud de los ecosistemas(14).
* Huella de carbono: este indicador mide la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por las prácticas agrícolas. Incluye las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso(14).
* Huella hídrica: este indicador mide la cantidad de agua utilizada en las prácticas agrícolas y su impacto en los recursos hídricos. Incluye el agua utilizada para el riego, la evaporación y la contaminación del agua(14).

Estos indicadores agroambientales permiten a los agricultores y a los gerentes de recursos evaluar el impacto de sus prácticas agrícolas en el medio ambiente y tomar medidas para mejorar la sostenibilidad de sus operaciones.

### Retos de la agricultura de precisión

La agricultura de precisión es una práctica promisoria que puede ayudar a abordar los retos que presenta la seguridad alimentaria, el agotamiento de los recursos naturales y el cambio climático(15). Sin embargo, la agricultura de precisión puede no ser asequible para todos los agricultores, especialmente para los pequeños y medianos(15). Los mercados de insumos, maquinaria, partes y mano de obra calificada deben desempeñarse eficientemente para que la agricultura de precisión pueda funcionar y ser rentable(15). Por lo tanto, es más fácil que la agricultura de precisión sea adoptada por fincas de gran tamaño, las cuales por lo general tienen mejor acceso a los mercados y para las que estos costos son inferiores a las ganancias potenciales que arroja la producción en gran escala(15).

La agricultura enfrenta varios retos, como la necesidad de producir más alimentos para alimentar a una población creciente, la necesidad de aumentar la producción de alimentos sin contribuir negativamente al medio ambiente y la necesidad de optimizar insumos y con prácticas agrícolas regenerativas(16). La agricultura de precisión puede ser el mejor aliado para superar estos retos(16). La agricultura de precisión hace referencia a la aplicación en agricultura de técnicas geoespaciales, tecnologías de la información y datos climáticos(16). La agricultura de precisión puede ayudar a optimizar el uso de insumos, reducir costos y aumentar la eficiencia(17). Además, la agricultura de precisión puede ayudar a reducir el impacto ambiental de la agricultura(17).

En resumen, la agricultura de precisión puede ser una respuesta a los retos que enfrenta la agricultura, como la necesidad de producir más alimentos para alimentar a una población creciente, la necesidad de aumentar la producción de alimentos sin contribuir negativamente al medio ambiente y la necesidad de optimizar insumos y con prácticas agrícolas regenerativas(15,16).

## Estaciones Meteorológicas

Las estaciones meteorológicas son dispositivos que se utilizan para medir y recopilar datos sobre las condiciones meteorológicas y los fenómenos atmosféricos en una determinada región(18). Estos dispositivos permiten predecir y analizar las condiciones meteorológicas y los fenómenos atmosféricos, como ciclones, huracanes, tormentas y sequías(18). Las estaciones meteorológicas miden variables como la temperatura, la humedad del aire, la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, la precipitación y la radiación solar(18).

Las estaciones meteorológicas están compuestas por varios instrumentos de medición, como el termómetro, el anemómetro, el pluviómetro, el barómetro y el higrómetro(19). Estos instrumentos miden diferentes variables meteorológicas y envían los datos a un registrador o a un sistema de monitoreo(18). Los datos recopilados se utilizan para predecir el clima y los fenómenos atmosféricos, y para realizar estudios climáticos y meteorológicos(18).

### Estaciones meteorológicas automáticas

Las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) son versiones autónomas y automatizadas de las tradicionales estaciones meteorológicas, diseñadas para ahorrar trabajo humano o realizar mediciones en áreas remotas o inhóspitas(20). Los sensores meteorológicos registran las observaciones, como la temperatura, la lluvia, la nieve, el viento, la presión atmosférica, la radiación solar, la velocidad y dirección del viento y las precipitaciones, con una frecuencia temporal configurable(21). Los datos se transmiten en tiempo real a través de sistemas de comunicación remotos y autónomos, como radio, satélite o teléfono(21).

Las EMAs son esenciales para la observación meteorológica, ya que ayudan a medir fenómenos meteorológicos extremos y salvaguardar la vida de las personas y la integridad de los bienes(21). La función principal de este tipo de estación es generar y transmitir un mensaje codificado, llamado mensaje sinóptico, el cual sigue los lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para su integración y difusión a nivel nacional e internacional(22).

Las EMAs están compuestas de varias partes que ayudan al aporte de observaciones y mediciones de las variables meteorológicas(23). A pesar de que muchos de estos sensores están automatizados, se basan o están inspirados en los instrumentos meteorológicos tradicionales o convencionales(23). Algunos de los sensores que integran una EMAs son el termómetro, el higrómetro, el barómetro, el anemómetro, el pluviómetro, el radiógrafo para medir propiedades atmósfera-sol, el cielógrafo para medir la altura de las nubes, el sensor de visibilidad y el sensor de energía o radiación solar(20,23).

### Estaciones meteorológicas automáticas en la agricultura

Las estaciones meteorológicas automáticas son cada vez más populares en la agricultura, ya que proporcionan a los agricultores datos precisos y en tiempo real sobre las condiciones climáticas en su área(24). Estas estaciones están compuestas por una torre o trípode, sensores, un sistema de adquisición de datos (datalogger) y comunicaciones (modem, radio)(24). Existen redes meteorológicas que son un conjunto de estaciones meteorológicas automatizadas distribuidas por una zona o región(24). Estas redes recogen los datos de forma continua y los envían a una base desde la que son procesados e interpretados y desde donde se ponen a disposición de los usuarios(24).

Los datos de la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas Automáticas (RNEAA) pueden consultarse y descargarse a través de la página web del Laboratorio(25). Las estaciones envían cada 15 minutos los paquetes de datos de seis variables meteorológicas: temperatura del aire, humedad relativa, lluvia (líquida)(25). Las estaciones meteorológicas pueden conectarse a los programadores de riego para iniciar o finalizar riegos según la temperatura ambiente y la humedad del suelo(26).

La monitorización meteorológica en la agricultura de precisión es determinante porque contribuye a una mejor gestión de los riesgos asociados al tiempo y al clima para conseguir la máxima producción(27). Las estaciones meteorológicas pueden integrarse con los sistemas de gestión de datos de ENVIRA IoT, lo que permite al usuario conocer el entorno y adelantarse incluso ante situaciones especiales de climatología(27). Además, se pueden instalar otros sensores de medidas atmosféricas que se precisen(27). En resumen, las estaciones meteorológicas automáticas son una herramienta valiosa para los agricultores, ya que les permiten tomar decisiones informadas para disminuir el impacto de las condiciones adversas del tiempo sobre los cultivos y organizar su sistema de producción en condiciones de mejora para el productor ante la eventual presencia de una plaga(24).

## Manejo de los Datos

### Adquisición de Datos

La adquisición de datos meteorológicos es esencial para la agricultura, ya que permite a los agricultores tomar decisiones informadas sobre el momento adecuado para plantar, regar y cosechar sus cultivos(28). Los servicios de asesoramiento agro meteorológico proporcionan información eficaz sobre el tiempo y el clima y los servicios de pronóstico para ayudar a los agricultores a minimizar los riesgos meteorológicos y climáticos en la agricultura(28). Estos servicios utilizan tres canales de difusión: medios de comunicación, campañas de sensibilización a grupos y contactos individuales para llegar a un mayor número de agricultores(28). Actualmente, alrededor de 19 millones de agricultores están suscritos a estos servicios(28).

La Base de Datos Climáticos de América Central (BDCAC) es una base de datos que incluye series de datos climáticos de la región, que datan desde el año 1970 en adelante y se ha venido utilizando por parte de los servicios meteorológicos(29). Esta base de datos es útil para la generación de productos informáticos que ayuden a la adaptación de diferentes sectores, incluyendo la agricultura(29).

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos también proporciona datos meteorológicos y oceánicos(30). Estos datos son cruciales para los pronósticos meteorológicos y proporcionan información relacionada con el clima y la biología del océano(30). La NOAA recopila datos y realiza análisis como parte del Sistema de Observación del Océano de la NOAA(30). Los datos recopilados por la NOAA son utilizados para informes trimestrales sobre ciertas variables clave del estado de los océanos(30).

### Transmisión de Datos

La agricultura de precisión es una técnica que utiliza la tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presente dentro de un lote(31). Esta técnica permite el control y la gestión de los campos a distancia mediante el uso de sensores en los campos, drones y satélites para la vigilancia desde el cielo(17). La transmisión de datos es esencial en la agricultura de precisión, ya que permite la recolección y análisis de información en tiempo real para tomar decisiones informadas(32).

La georreferenciación de los datos es un paso importante en la generación de información de apoyo en la agricultura de precisión(32). Esta técnica significa la ubicación de las imágenes que son captadas por los sensores en un sistema de referencia espacial con sus coordenadas, lo que permite la correcta localización de las imágenes en el mapa y puedan ser comparables con otras imágenes ubicadas en el mismo sistema de referencia(32). La interpolación es otro procedimiento útil en la agricultura de precisión, ya que permite la estimación de información a partir de aquellos que fueron medidos en campo(32). Esta técnica es útil en muchas ocasiones en la agricultura de precisión, pues por razones económicas o de mano de obra, es imposible muestrear en cualquier locación, teniendo que recurrir a la interpolación espacial, si se desea visualizar en un área determinada el comportamiento de una variable(32).

La agricultura de precisión es un mercado en crecimiento, impulsado por el cambio climático, la creciente demanda de alimentos y el aumento de la adopción de tecnologías inteligentes en el sector agrícola mundial(33). La FAO recopila y difunde estadísticas alimentarias y agrícolas oportunas y fiables a escala mundial(34). La organización elabora metodologías y normas estadísticas y ayuda a los Estados Miembros a desarrollar sistemas estadísticos mediante actividades de asistencia técnica y desarrollo de la capacidad(34).

#### Trasmisión por Wifi

La transmisión de datos por wifi en la agricultura de precisión es una aplicación del Internet de las cosas (IoT) en la agricultura(35). El protocolo de comunicación wifi es uno de los más utilizados en la agricultura de precisión, con un porcentaje aproximado del 21%(35). Este protocolo opera mediante un enlace de radiofrecuencia y ha sido utilizado en la agricultura de precisión bajo la plataforma IoT(35). Además, el protocolo GSM se encuentra con el 9% de frecuencia(35). Este es un protocolo de comunicación para telefonía celular, utilizado en el Internet de las cosas IoT aplicado en la agricultura de alta precisión(35).

La transmisión de datos por wifi en la agricultura de precisión permite la recolección y transmisión de datos en tiempo real(36). Las aplicaciones diseñadas para la mensajería, la geolocalización, las transacciones bursátiles, la detección de fraudes, la gestión de inventarios, el análisis de marketing, la supervisión de sistemas de TI y los datos del IoT industrial son algunos casos prácticos conocidos de transmisión de datos(36). La transmisión de datos por wifi también permite la implementación de soluciones de conectividad a Internet en zonas rurales minimizando los costos de conexión por usuario(37).

La transmisión de datos por wifi en la agricultura de precisión permite la recolección de datos sobre terrenos agrícolas, superficies equipadas para el riego, fertilizantes y plaguicidas(38). La plataforma de conocimientos sobre agricultura de la FAO proporciona una instantánea de datos sobre pequeños agricultores de todo el mundo(38). Además, CountrySTAT es un sistema de tecnología de la información en línea para la realización de estadísticas agrícolas y alimentarias en los planos nacional y subnacional(38).

#### Transmisión por LoRaWAN

La tecnología LoRaWAN se está utilizando en la agricultura de precisión para la monitorización de datos en tiempo real, la detección de equipos en el campo y el análisis de datos a largo plazo(39). La tecnología LoRaWAN es un protocolo de comunicación para redes de área amplia y de baja potencia (LPWAN) diseñado para la conexión inalámbrica de dispositivos que utilicen baterías hacia la internet a través de redes(40). La tecnología LoRaWAN es adecuada para implementaciones donde los nodos disponen de una energía limitada y no necesitan transmitir más de unos pocos bytes a la vez(41).

Los dispositivos habilitados para LoRa pueden manejar una multitud de situaciones en la agricultura inteligente que van desde rastrear una manada de ganado que se desplaza en un vasto campo, hasta controlar la humedad del suelo(39). Las tecnologías basadas en LoRa ofrecen una mayor duración de la batería y la detección para mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos(39). Los dispositivos basados en LoRa se pueden utilizar para monitorizar de cerca el riego del suelo en granjas agroindustriales(39). La tecnología LoRa optimiza y mejora las operaciones diarias en cada aplicación de agricultura inteligente(39).

La tecnología LoRaWAN permite al agricultor tener toda la información necesaria para conseguir una gestión eficiente de su cultivo(41). La tecnología LoRaWAN se presenta como una alternativa para solucionar los constantes problemas a los que se enfrenta el sector agroindustrial(40). Con el desarrollo de la ciencia y la tecnología, la etapa de aplicación del módulo LoRaWAN y otros dispositivos IoT relacionados en la agricultura estará cada vez más cerca(42).

#### Transmisión por ZigBee

[El protocolo ZigBee es una tecnología inalámbrica de bajo costo y baja potencia que se implementa ampliamente para aplicaciones de control y monitoreo, cubriendo el rango de 10-100 metros(43). En la agricultura de precisión, el protocolo ZigBee se utiliza como herramienta tecnológica para la transmisión de datos(44). La tecnología ZigBee es fácil de usar, eficaz y económica en las diferentes áreas de la agricultura(44).](#_bookmark218)

El protocolo ZigBee se asienta sobre la capa física y de enlace (subcapa de acceso al medio MAC), operando directamente por encima de estos niveles(45). La variedad de mecanismos para el establecimiento de claves es un aspecto característico de ZigBee(45). La principal debilidad que existe en la implementación de mecanismos de seguridad en ZigBee, deriva directamente de la limitación de recursos en los nodos, debido a que la mayoría de ellos se alimenta mediante baterías, tienen poco poder de cálculo y poca memoria(45).

En Nicaragua, se ha utilizado el protocolo ZigBee para la transmisión de datos en casos de desastres naturales(46). Las redes de sensores inalámbricos basadas en el protocolo ZigBee se han utilizado para la transmisión de mensajes a corta distancia(46). Las redes de malla ZigBee están diseñadas pensando en la ecuación de la ley de propagación de ondas(46).

En resumen, el protocolo ZigBee es una tecnología inalámbrica de bajo costo y baja potencia que se utiliza ampliamente en la agricultura de precisión para la transmisión de datos. La tecnología ZigBee es fácil de usar, eficaz y económica en las diferentes áreas de la agricultura. Sin embargo, la implementación de mecanismos de seguridad en ZigBee tiene debilidades debido a la limitación de recursos en los nodos.

## Diseño de Hardware

El diseño de hardware es un proceso que implica la creación de componentes de hardware teniendo en cuenta los requisitos del entorno de destino, el rendimiento, la seguridad, la confiabilidad y la sostenibilidad(47). Este proceso también implica la traducción de diseños lógicos en diseños físicos y la entrega de prototipos técnicos de los componentes propuestos para su aprobación y producción(47). El diseño de hardware puede ser costoso debido al alto costo del ciclo de diseño-prototipación-verificación. Para validar las características de hardware de un dispositivo, se pueden diseñar pruebas manuales de alto nivel(48). En resumen, el diseño de hardware es un proceso importante que implica la creación de componentes de hardware y la validación de sus características.

### Diseño esquemático y PCB

El diseño de hardware es un proceso crucial en la creación de dispositivos electrónicos. Este proceso se divide en dos etapas principales: el diseño esquemático y el diseño de PCB.

El diseño esquemático es la primera etapa del proceso de diseño de hardware. En esta etapa, se crea un diagrama que representa la estructura y la funcionalidad del dispositivo electrónico. El diseño esquemático se realiza utilizando software de diseño de circuitos, como Proteus, Altium Designer o Eagle. En este software, se seleccionan los componentes electrónicos necesarios y se conectan mediante líneas que representan las conexiones eléctricas. El diseño esquemático es una representación visual del circuito electrónico y se utiliza para verificar la funcionalidad del dispositivo antes de pasar a la siguiente etapa.

La siguiente etapa es el diseño de PCB. En esta etapa, se crea un diseño físico del circuito electrónico utilizando software de diseño de PCB, como Proteus, Altium Designer o KiCAD. El diseño de PCB implica la colocación de los componentes electrónicos en una placa de circuito impreso (PCB) y la creación de pistas de cobre que conectan los componentes. El diseño de PCB también incluye la selección de materiales y la determinación de las dimensiones de la PCB. El diseño de PCB es una etapa crítica del proceso de diseño de hardware, ya que una PCB mal diseñada puede afectar negativamente la funcionalidad del dispositivo.

En conclusión, el diseño de hardware se divide en dos etapas principales: el diseño esquemático y el diseño de PCB. El diseño esquemático es la primera etapa en la que se crea un diagrama que representa la estructura y la funcionalidad del dispositivo electrónico. El diseño de PCB es la siguiente etapa en la que se crea un diseño físico del circuito electrónico utilizando software de diseño de PCB. Ambas etapas son críticas para el éxito del proceso de diseño de hardware y deben ser realizadas con cuidado y precisión.

### Hardware Libre

El hardware libre es una filosofía que busca crear diseños de dispositivos informáticos de forma abierta, de manera que todas las personas puedan acceder, como mínimo, a los planos de construcción de los dispositivos(49). La información sobre la manera de comunicarse con el hardware, el diseño del mismo y las herramientas utilizadas para crear ese diseño deben ser publicadas para ser usadas libremente(49). El objetivo del hardware libre es permitir que cualquier persona pueda modificar, mejorar y compartir los diseños de los dispositivos(50).

Aunque no es tan conocido como el software libre, el hardware libre existe desde hace varios años (50). El origen de los proyectos basados en dispositivos de código abierto se remonta a la década de los 70 del siglo pasado, cuando el movimiento hippie popularizó la cultura del DIY (hazlo tú mismo)(50). El hardware libre es una forma de innovación donde los diseños se distribuyen bajo el amparo de licencias libres, pues éstas aseguran que cualquier conocimiento derivado beneficie a la comunidad(51).

El movimiento maker ha hecho resurgir la filosofía del hardware libre con proyectos donde se comparten componentes e información sobre dispositivos para que cualquiera pueda mejorarlos(51). Algunos ejemplos de hardware libre son la placa Arduino, Raspberry Pi y BeagleBone(1,50). La placa Arduino es un microcontrolador programable creado con hardware libre, basado en una placa con entradas y salidas analógicas y digitales, que pueden ser conectadas a una PC(1). Raspberry Pi es una computadora de placa única del tamaño de una tarjeta de crédito que se conecta a un monitor o TV y se utiliza como una computadora de escritorio(50). BeagleBone es una placa de desarrollo de hardware libre que se utiliza para crear dispositivos electrónicos interactivos(50).

## Conclusiones del capitulo

El diseño e implementación del hardware para la estación meteorológica Vórtice implica la creación de componentes de hardware que cumplan con los requisitos del entorno destino, el rendimiento, la seguridad y la confiabilidad. Además, se deben diseñar pruebas para medir el rendimiento de los prototipos y los resultados de producción en comparación con las especificaciones y sus requerimientos.

El diseño e implementación del hardware para la estación meteorológica Vórtice requiere la consideración de múltiples factores, desde los requisitos del entorno hasta la precisión del sistema, y se puede lograr de manera efectiva utilizando metodologías de diseño de hardware acordes y eficientes.

1. Diseño y desarrollado de hardware

## Requerimientos de diseño

El desarrollo de un producto tecnológico requiere de una planificación cuidadosa y detallada de los requerimientos de diseño. En primer lugar, es importante definir el propósito y la funcionalidad del producto, así como las necesidades y expectativas del usuario final. Esto permitirá establecer los objetivos de diseño y los criterios de éxito del proyecto. Además, se deben considerar aspectos como la ergonomía, la estética, la usabilidad y la accesibilidad para garantizar una experiencia de usuario satisfactoria.

Otro aspecto importante en el diseño de un producto tecnológico es la selección de los materiales y componentes adecuados. Esto incluye la elección de materiales resistentes y duraderos, así como la selección de componentes que cumplan con los estándares de calidad y seguridad requeridos. También es importante considerar la facilidad de producción, replicabilidad, mantenimiento y reparación del producto.

En cuanto al diseño estético, es importante que el producto tenga un aspecto atractivo y moderno, pero también funcional y coherente con la marca y la identidad visual de la empresa. El diseño debe ser intuitivo y fácil de usar, y debe estar en línea con las tendencias actuales del mercado.

### Consideraciones Físicas

Teniendo en cuenta la filosofía de trabajo descrita anteriormente se trazo la expectativa siguiente:

* El equipo deberá operar tanto en interiores como exteriores.
* El equipo debe ser usado a no menos de 2 metros del suelo y no más de 15.
* Las dimensiones del equipo no sobrepasán los 60 cm de alto y los 30 cm de diámetro.
* Se deberá poder acceder de forma simple al medio de almacenamiento utilizado para guardar los datos

### Consideraciones de Hardware

Teniendo en cuenta la filosofía de trabajo descrita anteriormente se trazo la expectativa siguiente:

* La conexión del equipo será dual, o sea, cumplirá las funciones de conexión wifi como de punto de acceso.
* La autonomía del equipo debe ser superior a 15 días, con sus correspondientes mecanismos de optimización y ahorro de batería.
* Deberá admitir alimentación por panelearía solar
* La fuente de alimentación a la red eléctrica será externa y autovolt
* Deberá incorporar un reloj de tiempo real y un sistema de almacenamiento de datos
* De Deberá be contar con una capacidad sensorial de 8 sensores como mínimo.

## Sensores

El desarrollo de un producto tecnológico es un proceso complejo que implica varias etapas. En este caso, teniendo en cuenta que el producto a desarrollar tiene una función de monitorización pues el primer paso será definir las variables a medir y la instrumentación adecuada.

### Variables

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| No. | VARIABLE METEOROLOGICA | DESCRIPCION |
| 1 | Temperatura | Valor de la temperatura ambientes |
| 2 | Humedad | Valor de la humedad relativa |
| 3 | Presión | Valor de la presión atmosférica |
| 4 | Iluminación | Valor de la iluminación ambiental |
| 5 | Dirección del viento | Punto cardinal de la dirección del viento |
| 6 | Velocidad del viento | Valor de la velocidad del viento |
| 7 | Precipitaciones | Valor acumulado de 24h |
| 8 | Descargas eléctricas | Valor de la cantidad de descargas eléctricas(rayos) |

#### Medición de la humedad y la temperatura

La medición de la temperatura y la humedad es importante en varios campos, incluidos la agricultura, los centros de datos y el control ambiental. En la agricultura, los sensores de temperatura y humedad se pueden utilizar para optimizar los sistemas de riego y evitar daños en las plantas por falta de agua o exceso de riego(52).

En los centros de datos, la medición de la temperatura y la humedad es fundamental para evitar el sobrecalentamiento, la oxidación y los incendios de los equipos(53).

En el monitoreo ambiental, los sensores de temperatura y humedad pueden usarse para monitorear la salud de la flora y la fauna y de esta forma mejorar la educación, la conciencia y la capacidad para mitigar el cambio climático y tener una gestión sostenible de los recursos naturales(54).

Para la lectura de la temperatura y la humedad ambiente de este trabajo se utilizó la familia de sensores DHT. Un sensor de bajo costo que es capaz de leer ambas variables. El análisis de la literatura y las pruebas conducidas en el laboratorio determinaron que la precisión de este sensor es adecuada para los resultados esperados del dispositivo.

#### Medición de pluviometría, dirección y velocidad del viento

El tamaño, precio y geometría del anemómetro (sensor de velocidad del viento) dificultaba su importación; esta situación sumada a los largos tiempo de espera de entrega de materiales y la no existencia en almacén de ningún sensor de este tipo pues conllevó al desarrollo de un anemómetro 100% original para este equipo.

El anemómetro desarrollado por el equipo de hardware consta de un elemento mecánico similar a una hélice con un pequeño imán adherido a una de las paredes internas de la pieza. En la base del dispositivo se encuentra un sensor de efecto Hall digital, encargado de emitir un pulso cada vez que el imán pasa por delante del sensor. En la Ilustración 1 se aprecia el diseño del mismo.

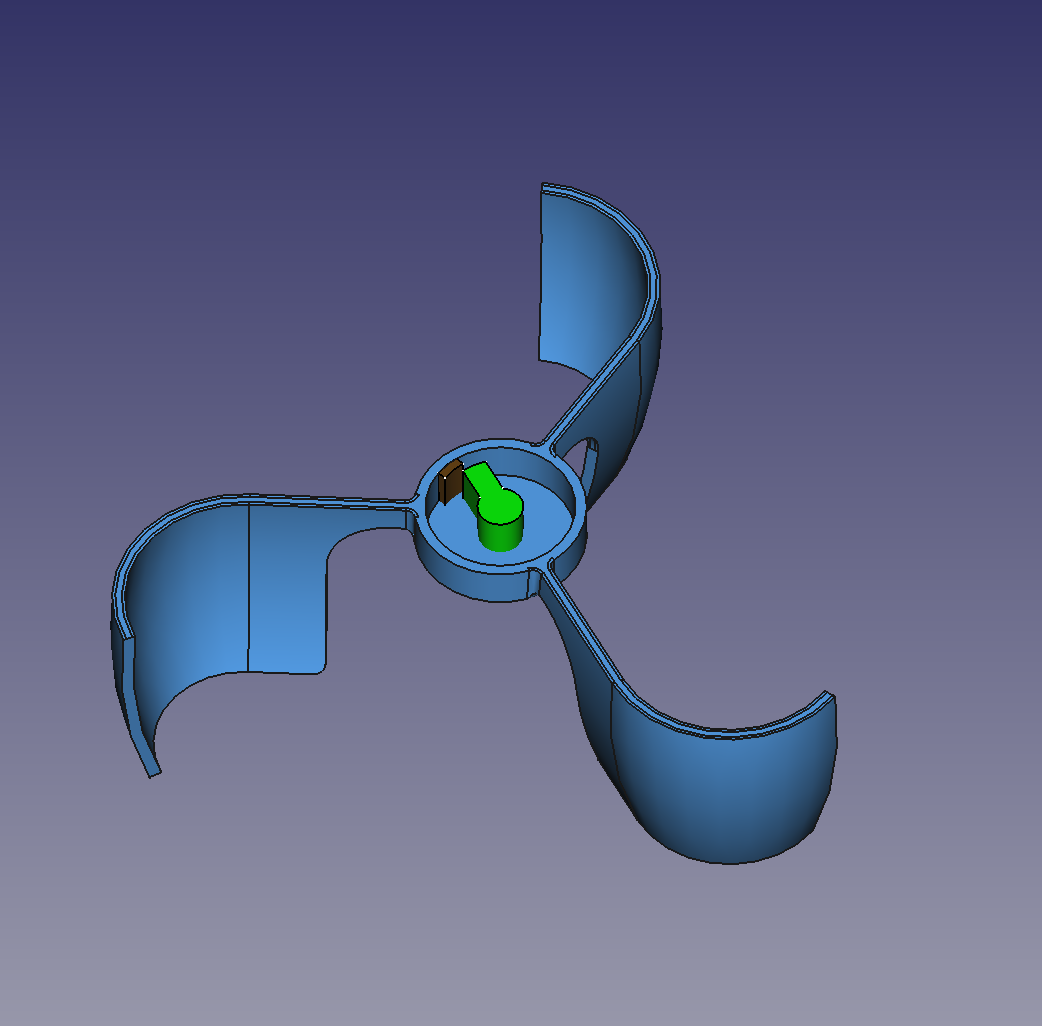


Ilustración 1.Componentes del anemómetro. Hélice (azul), imán (marrón), sensor de efecto hall(verde)

Este pulso activa una interrupción en el microcontrolador incrementando el contador de vueltas. Las vueltas son contadas durante 1 segundo, por lo que este número equivale directamente a la velocidad angular del anemómetro.

Utilizando está información se realizan los cálculos necesarios para obtener la velocidad en m/s mediante la ecuación 1.

S = R × 2 × π × ω (1)

Donde:

S: Velocidad lineal en m/s del anemómetro.

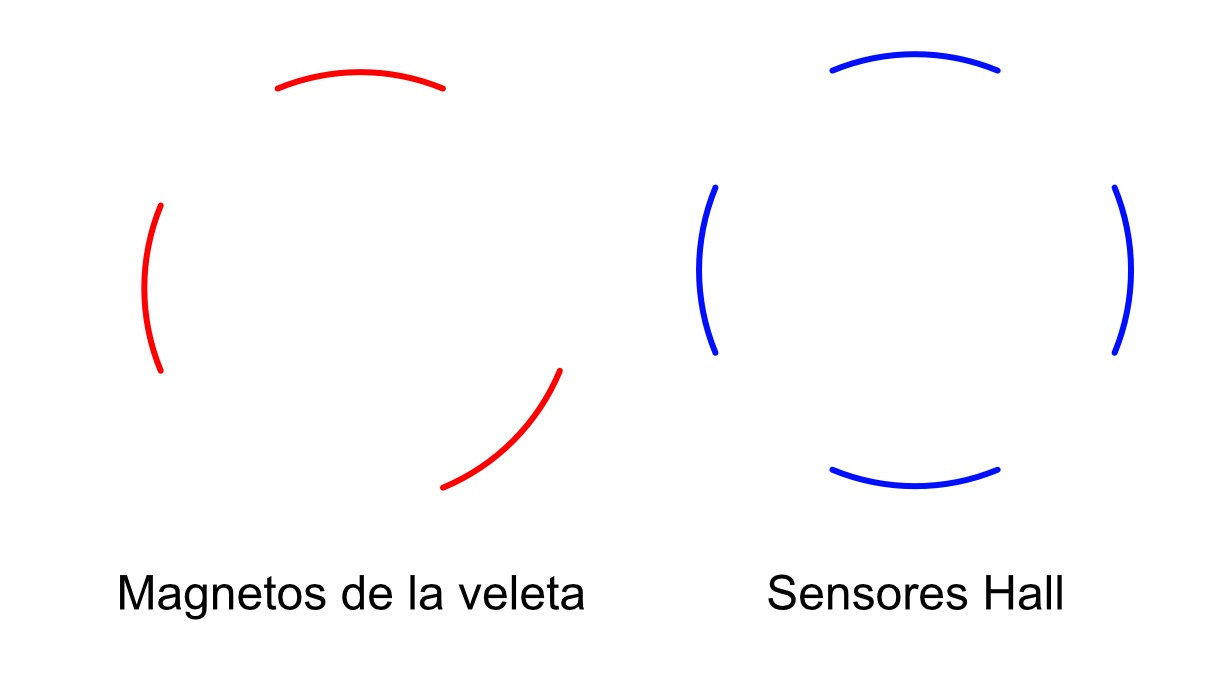
R: Radio del anemómetro.

ω: Velocidad angular.

Encontrando las mismas dificultades logísticas en los sensores de veleta y pluviómetro que en el anemómetro y tomando como experiencia El sensor de dirección del viento, pues también fue desarrollado utilizando el efecto hall estos dos sensores.

En el caso de la veleta, después de muchos intentos se concluyó en un diseño de tres imanes y cuatro sensores hall. Con este arreglo es posible obtener 3 bits de resolución en la medición de la dirección del viento. En la Ilustración 2 se muestra la relación de distribución de los componentes en una vista simplificada de la veleta. De esta forma siempre están activos uno o dos sensores en un instante de tiempo determinado.

Las posiciones posibles de la veleta generan los valores que se muestran en la Tabla 1.



Ecuación 2.Distribución de los sensores en la veleta.

Finalmente el pluviómetro desarrollado consiste en un embudo y un mecanismo de balde basculante(55,56). La b ´ascula tiene una capacidad de 20 mL en cada extremo. En la Figura 3

se ilustra el dise ˜no de este componente.

La medida de las precipitaciones se obtiene contando el n ´umero de veces que la

v ´alvula ha oscilado en el d´ıa y utilizando la ecuaci ´on 2.

n × Ve

Pmm =

A

(2)

Donde:

n: N ´umero de oscilaciones de la b ´ascula.

Ve: Capacidad volum ´etrica de cada copa en litros (L).

Pmm: Valor de precipitaci ´on en mil´ımetros (mm).

A: ´Area de la secci ´on superior del embudo del pluvi ´ometro en metros cuadrados

(m

Referencias

1. Medrano A, Chourio-Acevedo L. HARDWARE LIBRE Y ABIERTO, MODELOS DE NEGOCIOS PARA AMÉRICA LATINA E EL CARIBE. 13 de abril de 2017;

2. Velasco Martínez VD, Flores García F, Cervantes G, Medina M, Moreno C. H. Desarrollo y validación de una estación meteorológica automatizada de bajo costo dirigida a agricultura. Rev Mex Cienc Agríc. 1 de septiembre de 2015;6:1253-64.

3. Cintra Hernadez R del C, Romero Amondaray L, Marínez Hernández M, Pérez Montero O. IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE BAJO COSTO CON RASPBERRY PI. Revista Telemática. abril de 2020;19(1):11-21.

4. Agricultura inteligente con respecto al clima [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/topic/climate-smart-agriculture

5. Agricultura inteligente: qué es, beneficios y principales tecnologías [Internet]. TOTVS. 2022 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://es.totvs.com/blog/cat-agroindustria/agricultura-inteligente-que-es-beneficios-y-principales-tecnologias/

6. La agricultura climáticamente inteligente | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/es/

7. ¿Cuál es el futuro de la agricultura en un mundo pospandemia? [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2020/11/12/future-of-agriculture-in-a-post-pandemic-world-latin-america

8. La innovación agrícola y la tecnología son la clave para reducir la pobreza en los países en desarrollo, según un informe del Banco Mundial [Internet]. World Bank. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2019/09/16/agricultural-innovation-technology-hold-key-to-poverty-reduction-in-developing-countries-says-world-bank-report

9. Agricultura y alimentos [Internet]. World Bank. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview

10. Desarrollo de prácticas agrícolas inteligentes [Internet]. IAEA; 2018 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.iaea.org/es/temas/desarrollo-de-practicas-agricolas-inteligentes

11. Ortega JS. Agricultura inteligente para protegerse del cambio climático. El País [Internet]. 12 de septiembre de 2020 [citado 25 de marzo de 2023]; Disponible en: https://elpais.com/elpais/2020/09/10/planeta\_futuro/1599723844\_846240.html

12. Agricultura sostenible | Objetivos de Desarrollo Sostenible | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/sustainable-agriculture/es/

13. Compendio de la OCDE de indicadores agroambientales [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/sites/9789264186217-sum-es/index.html?itemId=%2Fcontent%2Fcomponent%2F9789264186217-sum-es

14. INDICADORES AMBIENTALES: qué son, tipos y ejemplos [Internet]. ecologiaverde.com. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.ecologiaverde.com/indicadores-ambientales-que-son-tipos-y-ejemplos-2759.html

15. Agricultura de precisión: una posible respuesta al cambio climático y a la seguridad alimentaria. [Internet]. Sostenibilidad. 2017 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/agricultura-de-precision-una-posible-respuesta-al-cambio-climatico-y-a-la-seguridad-alimentaria-pero-es-asequible-para-todos-2/

16. los Retos de la Agricultura [Internet]. ENIIT - IT Business School. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://eniit.es/retos-de-la-agricultura/

17. Agricultura De Precisión: De La Teoría A La Práctica [Internet]. 2020 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://eos.com/es/blog/agricultura-de-precision/

18. Estaciones Meteorológicas. ¿Qué son y cómo funcionan? - SensorGO [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://sensorgo.mx/estaciones-meteologicas/

19. León J. INFORME SOBRE LA ESTACION METEOROLOGICA - Informes - Jorge Leon [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.clubensayos.com/Ciencia/INFORME-SOBRE-LA-ESTACION-METEOROLOGICA/4080557.html

20. About the Automatic Weather Station project [Internet]. 2009 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://web.archive.org/web/20090204082102/http://uwamrc.ssec.wisc.edu/aboutaws.html

21. Estación meteorológica automática (EMA) - ADASA [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.adasasystems.com/es/tecnologia/estacion-meteorologica-automatica-ema.html

22. Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA’s) [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s

23. Tito B. ▷ Estaciones Meteorologicas Automaticas como funcionan [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://ingenieriaambiental.net/estaciones-meteorologicas-automaticas/

24. Estaciones meteorológicas en la agricultura [Internet]. iRiego New Generation S.L. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: http://iriego.es/blog/noticias-2/post/estaciones-meteorologicas-en-la-agricultura-175

25. Pizarro E por C. Agrometeorología: del monitoreo del clima a la agricultura climáticamente inteligente [Internet]. Agriculturers.com | Red de Especialistas en Agricultura. 2017 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://agriculturers.com/agrometeorologia-del-monitoreo-del-clima-a-la-agricultura-climaticamente-inteligente/

26. Estación Meteorológica para agricultura:Viento, lluvia, humedad... [Internet]. Maher Electrónica. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.maherelectronica.com/sensores-agricolas-clima/estacion-meteorologica-para-agricultura/

27. Monitorización meteorológica en agricultura de precisión [Internet]. Envira IOT. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://enviraiot.es/monitorizacion-meteorologica-agricultura-precision/

28. Rathore LS, Chattopadhyay N. Servicios meteorológicos y climáticos para los agricultores de la India [Internet]. 2017 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/servicios-meteorolo%CC%81gicos-y-clima%CC%81ticos-para-los-agricultores-de-la-india

29. Base de Datos Climáticos de América Central (BDCAC) – Centro Clima [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://centroclima.org/clima/bdcac/

30. Datos - NOAA/AOML [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.aoml.noaa.gov/es/data-products/

31. 8CyT12.pdf [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf

32. Agropedia E. Agricultura de precisión: qué es, ventajas y desventajas [Internet]. Agrotendencia.tv. 2020 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos/agricultura-de-precision/

33. Tamaño del mercado de agricultura de precisión, compartir | 2022 - 27 | Estadísticas de la Industria [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-precision-farming-market-industry

34. Estadísticas alimentarias y agrícolas [Internet]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: http://www.fao.org/food-agriculture-statistics/es/

35. Soto JPT, Suárez J de los SS, Rodríguez AB, Cainaba GOR. Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. Lámpsakos. 2019;(22):86-105.

36. ¿Qué es la transmisión de datos? [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.redhat.com/es/topics/integration/what-is-streaming-data

37. Radicelli-García CD, Pomboza-Floril M, Cepeda-Astudillo L. Conectividad a Internet en zonas rurales mediante tecnologías de TDT (DVB-RCT2), o telefonía móvil (4G-LTE). DYNA. 2018;85(204):319-24.

38. Fuentes de datos | Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.fao.org/family-farming/data-sources/es/

39. iAgua redaccion. Soluciones LoRa para agricultura inteligente [Internet]. iAgua. iAgua; 2019 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.iagua.es/noticias/catsensors/soluciones-lora-agricultura-inteligente

40. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Perú et al. - 2019 - Implementación de Lora y Lorawan como escenario fu.pdf.

41. Borrero JD. Aplicación de la tecnología LoRaWAN en la agricultura. 2018.

42. Aplicación del módulo LoRaWAN en agricultura inteligente [Internet]. 2021 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.mokolora.com/es/lorawan-module-in-intelligent-agriculture/

43. ZigBee Tamaño del mercado, Compartir| 2022 - 27 | Pronóstico de crecimiento [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/zigbee-market

44. Jimenéz JML. El protocolo ZIGBEE como recurso a la tecnología en la agricultura de precisión. 2016;

45. Seguridad en comunicaciones ZigBee | INCIBE-CERT [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.incibe-cert.es/blog/seguridad-comunicaciones-zigbee

46. 53104633.pdf [Internet]. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://core.ac.uk/download/pdf/53104633.pdf

47. Diseño de hardware [Internet]. SFIA. [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://sfia-online.org/es/sfia-8/skills/hardware-design

48. v-annene. Comprobación del diseño de hardware: Azure Sphere [Internet]. 2023 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://learn.microsoft.com/es-es/azure-sphere/hardware/hardware-design-verification

49. Delgado A. ¿Qué es el hardware libre? | Consumer [Internet]. 2007 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.consumer.es/tecnologia/hardware/que-es-el-hardware-libre.html

50. BBVA. ¿Qué es el ‘hardware’ libre? [Internet]. BBVA NOTICIAS. 2018 [citado 25 de marzo de 2023]. Disponible en: https://www.bbva.com/es/innovacion/que-es-el-hardware-libre/

51. Montenegro A, Ochoa Duarte A, Buitrago D, Galindo C. Hardware Libre: una tecnología democrática. En 2017.

52. Martín Gómez PF, Montoya Gómez JO, Muñoz Serrano GE. Sistema de riego autónomo para pequeños cultivos basado en medición de temperatura y humedad. En: Revista Politécnica [Internet]. 2017 [citado 3 de mayo de 2023]. p. 65-74. Disponible en: http://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1141

53. Jiménez-Morales JB, Suárez-Cansino J, López-Morales V, Franco-Árcega A. Internet de las cosas y variaciones de temperatura y humedad dentro de un site. Pädi Bol Científico Cienc Básicas E Ing ICBI. 31 de agosto de 2022;10(Especial3):112-9.

54. Vargas Capera YS, Hernández Hernández CA, Escarraga Escobar NE, Pineda Cadena E. Análisis, diseño, desarrollo y despliegue de un sistema informático para el monitoreo de temperatura y humedad de especies nativas de flora, utilizando IOT, en el municipio de Girardot en el vivero Guabinal, para el 2022. 7 de septiembre de 2022;1-10.

55. Liao M, Liao A, Liu J, Cai Z, Liu H, Ma T. A novel method and system for the fast calibration of tipping bucket rain gauges. J Hydrol. 1 de junio de 2021;597:125782.

56. Hu Y, Zhou J, Li J, Ma J, Hu Y, Lu F, et al. Tipping-bucket self-powered rain gauge based on triboelectric nanogenerators for rainfall measurement. Nano Energy. 1 de julio de 2022;98:107234.