



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“Implementación de un Sistema de Monitoreo y Posicionamiento
Geográfico para la Prevención de Incendios Forestales Mediante una Red
Sensorial.”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

EDISSON FERNANDO MOROCHO BARROS

JEREMY WILLIAM RÍOS BARRERA

Director:

Ing. HUGO MARCELO TORRES SALAMEA Ph.D.

CUENCA - ECUADOR

2021

Implementación de un Sistema de Monitoreo y Posicionamiento Geográfico para la Prevención de Incendios Forestales Mediante una Red Sensorial.

RESUMEN

Un problema que amenaza con la integridad del medio ambiente son los incendios forestales, razón por la cual el objetivo del proyecto es monitorear los parámetros ambientales como posición geográfica, temperatura, monóxido de carbono, dióxido de carbono, velocidad y dirección del viento, mediante una red de 3 nodos sensoriales con comunicación LoRa a 915 Mhz, para así alertar el inicio de un incendio forestal mediante ThingSpeak. El equipo implementado obtuvo resultados similares en comparación al equipo de Libelium en cuanto a las mediciones de temperatura, velocidad y dirección del viento. Finalmente, la comunicación LoRa tuvo un alcance máximo de 1km.

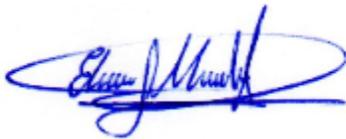
Palabras clave: Comunicación LoRa, IoT, Incendios Forestales, GPS, Sensores, Libelium, ThingSpeak.



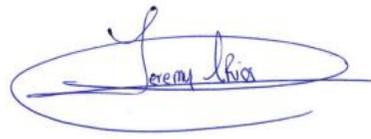
Ing. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D.
Coordinador de Carrera



Ing. Hugo Marcelo Torres Salamea Ph.D.
Director de Trabajo de Titulación



Edisson Fernando Morocho Barros
Autor



Jeremy William Ríos Barrera
Autor

Implementation of a Monitoring and Geographic Positioning System to Prevent Forest Fires through a Sensory Network.

ABSTRACT

Forest fires are a problem that threatens environmental integrity. For this reason, the objective of this project was to monitor environmental parameters such as geographical position, temperature, carbon monoxide, carbon dioxide, wind speed and direction, through a network of 3 sensory nodes with LoRa communication at 915 Mhz, in order to alert the start of a forest fire by using ThingSpeak. The equipment showed similar results compared to the Libelium equipment in terms of temperature, speed and wind direction measurements. Finally, the LoRa communication had a maximum range of 1km.

Keywords: LoRa Communication, IoT, Forest Fires, GPS, Sensors, Libelium, ThingSpeak.



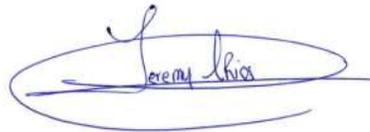
Eng. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D.
Faculty School Director.



Eng. Hugo Marcelo Torres Salamea Ph.D.
Thesis Director



Edisson Fernando Morocho Barros
Author



Jeremy William Ríos Barrera
Author

Translated by



Edisson Morocho

Implementación de un Sistema de Monitoreo y Posicionamiento Geográfico para la Prevención de Incendios Forestales Mediante una Red Sensorial.

Edisson Fernando Morocho Barros
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay, UDA
Cuenca, Ecuador
edisson21m@es.uazuay.edu.ec

Jeremy Ríos William Barrera
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay, UDA
Cuenca, Ecuador
jeremy@es.uazuay.edu.ec

Resumen—Un problema que amenaza con la integridad del medio ambiente son los incendios forestales, razón por la cual el objetivo del proyecto es monitorear los parámetros ambientales como posición geográfica, temperatura, monóxido de carbono, dióxido de carbono, velocidad y dirección del viento, mediante una red de 3 nodos sensoriales con comunicación LoRa a 915 Mhz, para así alertar el inicio de un incendio forestal mediante ThingSpeak. El equipo implementado obtuvo resultados similares en comparación al equipo de Libelium en cuanto a las mediciones de temperatura, velocidad y dirección del viento. Finalmente, la comunicación LoRa tuvo un alcance máximo de 1km.

Palabras clave— *Comunicación LoRa, IoT, Incendios Forestales, GPS, Sensores, Libelium, ThingSpeak.*

I. INTRODUCCIÓN

Se conoce como incendio forestal al fuego que se extiende sin control sobre los bosques, en él intervienen diferentes factores ambientales como la presencia de altas temperaturas en días de verano, radiación solar, hojas secas, rayos causados por las tormentas e incluso fuegos ocasionados intencionalmente, lo que producen un riesgo de deforestación y extinción de especies de animales y plantas, que ocasionará un periodo largo de recuperación del ecosistema y su hábitat [1] [2].

Durante el periodo septiembre 2019 a enero 2020 en Australia se registró uno de los incendios forestales más grandes del mundo, en diferentes regiones del país se registraron mediciones de la calidad del aire 20 veces por encima del nivel peligroso, además, la agencia de noticias EFE publicó una infografía en la que indica que el fuego arrasó con más de 6 millones de hectáreas y se estima que mil millones de animales murieron en todo el país [3]. Según la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M), muchas comunidades enfrentaron vientos de 60 a 80 kilómetros por hora y temperaturas de entre 35° C y 39° C [4].

La Amazonía conocida como el pulmón del planeta, genera el 20% de oxígeno de la Tierra, logrando abastecer a 7510 millones de humanos y un sin número de animales y plantas. En agosto del 2019, fue afectada por múltiples

incendios forestales, el Instituto Nacional de Investigación Espacial de Brasil (INPE) reportó 72.843 incendios en Brasil, lo que indica un aumento de más del 80% en comparación con el año 2018. De todos estos incendios, el 52,5% se ubicaba en la región amazónica [5].

Ecuador no es la excepción a este problema, un ejemplo muy claro se localiza en la provincia del Azuay donde se encuentra el Parque Nacional El Cajas, uno de los lugares más visitados por turistas nacionales y extranjeros, cuenta con una fauna y flora muy diversa, al menos 16 especies de plantas vasculares son únicas del área, 12 de ellas se encuentran en peligro de extinción y 4 bajo amenaza [6]. En diciembre del 2018 se registró 90 hectáreas devastadas por incendios forestales según la Secretaría de Gestión de Riesgos, por lo que es importante tomar medidas oportunas que prevengan la quema de bosques y permitan conservar el medio ambiente protegiendo zonas donde existe variedad de fauna silvestre [7].

En base a los problemas presentados anteriormente, el campo de la Ingeniería Electrónica ha desarrollado diversos proyectos a nivel mundial con el fin de evitar y controlar a tiempo la presencia de un incendio forestal.

En Europa se implementó un sistema de detección de incendios forestales, en el que se emplearon equipos de Libelium para cubrir un área aproximada de 210 hectáreas con solo 90 Waspmotes (Nodos) capaces de medir 4 parámetros cada 5 minutos: Temperatura, Humedad relativa, Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO₂) [8]. En otro estudio se utilizaron múltiples UAVs (vehículos aéreos no tripulados), permitiendo integrar diferentes drones con diversas características, con el fin de enviar fotografías al usuario o base de datos encargado de recopilar la información para la toma de decisiones [9]. El municipio de Mirandela (Portugal) realizó evaluaciones de investigaciones históricas de sucesos pasados, incluida la cantidad de incendios, áreas quemadas, ubicaciones y causas; con lo que se tomaron acciones específicas para reducir el riesgo de un incendio forestal [10].

El proyecto denominado Forest Fire System, permite la detección temprana de incendios, consta de una red sensorial

para la detección de humo, conectada a través del protocolo Zigbee (IEEE 802.15.4), además utiliza la tecnología GSM para enviar un mensaje de texto al administrador [11]. La revista Forex publicó el desarrollo de un sistema que permite observar el incendio desde diferentes ángulos, mediante cámaras visuales e infrarrojas, las mismas que soportan altas temperaturas [12].

Las investigaciones y proyectos desarrollados por las diferentes universidades del mundo, son de gran importancia para controlar los incendios forestales, logrando proteger una gran variedad de especies animales y plantas. La Universidad Piloto de Colombia desarrolló un sistema de monitoreo en la nube para medir los riesgos ambientales basados en sensores de bajo costo como: sensor de gas MQ135, sensor de temperatura y humedad DTH11, sensor de distancia HC-SR04, sensor de lluvia FC-37 y un sensor de luz ambiente TMT6000 [13].

Ecuador también se ha inmiscuido en este problema que ocasiona gran preocupación a nivel global. En Riobamba, se realizó un sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas, capaz de medir información ambiental como temperatura, humedad y presencia de humo. Para la recolección de datos de forma inalámbrica, utilizaron la tecnología Zigbee [14].

En la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Michilena diseñó un sistema de monitoreo de incendios forestales en tiempo real basado en internet de las cosas y plataformas como servicio en la nube. El sistema integra la información procedente de los nodos sensoriales, con la información histórica. Se utilizaron sensores de temperatura, humedad relativa, concentración de monóxido de carbono (CO), humo y flama [15].

Detectar a tiempo el inicio de un incendio forestal es primordial para proteger el medio ambiente. La revista IEEE publicó un proyecto en el que se diseñó e implementó un sistema basado en IoT el cual es autosuficiente, y envía la ubicación exacta por GPS al personal de extinción de incendios. Este sistema contiene un sensor de temperatura DHT11 y un sensor de humo MQ2. La información es transmitida a la nube mediante un módulo Wifi llamado ESP8266 [16] [17].

La gran cantidad de bosques y otros espacios verdes existentes en Ecuador, motiva el presente trabajo, que tiene como objetivo implementar una red de sensores inalámbricos basado en internet de las cosas que alerte al guardabosque o personal del Cuerpo de Bomberos sobre el inicio de un incendio forestal, lo cual tendrá beneficios permitiendo un control oportuno del incendio, que de no ser detectado tendría consecuencias fatales para la flora, la fauna y para el medio ambiente en general.

II. MARCO TEÓRICO

A. Elementos Principales Para Producir Un Incendio Forestal.

Un incendio forestal es producido por tres factores principales: combustible, comburente y fuente de calor.

El combustible es el elemento principal para la combustión, el comburente (Oxígeno) es el elemento que reacciona con el combustible, se encuentra en abundancia en el aire. Como tercer factor se tiene la fuente de calor, la cual genera la energía necesaria para iniciar la combustión; puede ser una descarga eléctrica, incluso temperaturas elevadas en periodos de sequía [1]. Los elementos para producir un incendio se representan mediante un triángulo del fuego mostrado en la Figura 1.

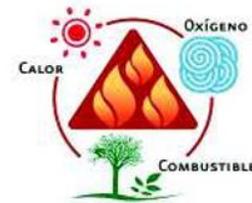


Fig. 1. Triángulo del Fuego [1].

B. Wireless Sensor Network, Red de Sensores Inalámbricos (WSN).

Las WSN surgen con la finalidad de cubrir áreas donde el cableado es limitado, además se caracteriza por tener un reducido consumo de energía. Los sensores ambientales son dispositivos que permiten recolectar información por medio de señales, digitales o analógicas [13].

C. Topologías de Redes Inalámbricas de Sensores.

a) *Punto a punto*: Esta comunicación es la más sencilla debido a su tipo de conexión, aun así, uno de los puntos debe ser coordinador [15].

b) *Estrella*: En esta topología los nodos finales se sitúan alrededor del nodo coordinador ubicado en el centro. Los nodos finales no se comunican directamente, sino a través del nodo central “coordinador” [15].

c) *Árbol*: La comunicación de cada nodo hacia el coordinador se da en una sola trayectoria, si el nodo router falla, los demás nodos también pierden la trayectoria porque dependen de él [15].

d) *Malla*: A diferencia de la topología árbol en la cual existía una sola trayectoria, los nodos pueden seguir diferentes trayectorias para llegar al router principal [15].

D. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El GPS está compuesto por una constelación de 24 satélites colocados en órbita a unos 20200km de la Tierra, funciona las 24 horas del día, sin importar las condiciones meteorológicas. Los receptores GPS, utilizan la triangulación para determinar la localización en cualquier lugar del planeta. Este sistema trabaja en la banda central de los 1575.42 Mhz [17].

E. Sistemas de Comunicaciones Inalámbricos

En la actualidad los sistemas de comunicaciones inalámbricos ofrecen ventajas como: abaratamiento de costos con respecto al cableado tradicional y una velocidad

de transmisión cada vez mayor. A continuación, se realizará un estudio comparativo de las diferentes tecnologías existentes de corto y largo alcance.

a) Bluetooth: Es una tecnología inalámbrica de corto alcance (10 metros) que utiliza el protocolo de comunicación IEEE 802.15 para la transmisión de voz y datos entre dispositivos, mediante radiofrecuencia. Bluetooth opera en la banda de frecuencia de 2.4GHz y se caracteriza por ser robusto, tener bajo consumo y costo [18].

b) Wifi: Pertenece a los estándares IEEE 802.11 b/a/g/n, que trabajan en dos bandas de frecuencia: 2.4GHz y 5GHz. La red Wifi permite la conexión de varios dispositivos electrónicos de manera inalámbrica, ya sea en hogares, oficinas, lugares públicos, etc. Tiene una cobertura de hasta 300 metros en espacio abierto y de 90 metros en un entorno cerrado [19].

c) Zigbee: Se basa en el estándar IEEE 802.15.4 y opera en tres bandas de frecuencia: 868 MHz en Europa, 915 MHz en EEUU y 2.4GHz en todo el mundo. Se centra en dispositivos de bajo costo, bajo consumo, velocidades de transmisión bajas, seguridad, fiabilidad y una amplia cobertura inalámbrica (10 a 70 metros). Existen tres tipos de topología: en estrella, en árbol y en red mallada (mesh) [20].

d) LoRa: Es un protocolo de comunicación de radio de baja potencia, que opera en las bandas de 433MHz, 868MHz y 915MHz, logrando una cobertura de 2 a 5 km de distancia en zonas urbanas donde hay mucha interferencia, y hasta 15 km en zonas despejadas. La red LoRa utiliza el protocolo LoRaWAN para enviar y recibir datos de los sensores. Está pensada para comunicar dispositivos de bajo costo y bajo consumo energético, necesario para alargar la vida útil de las baterías [20].

TABLA I. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS [21] [22]

Tecnología	Alcance	Velocidad Tx	Frecuencia	Protocolo	Consumo
Bluetooth	10 metros	3Mbps	2.4GHz	IEEE 802.15	Medio
Wifi	100 metros	100Mbps	2.4GHz y 5GHz	IEEE 802.11 b/a/g/n	Alto
Zigbee	10-70 metros	250Kbps	868MHz 915MHz 2.4GHz	IEEE 802.15.4	Bajo
LoRa	2 a 5km urbano, 15km (rural)	19.2Kbps	433MHz, 868MHz 915MHz	LoRaWAN	Muy bajo

En base al análisis realizado con respecto a las características y especificaciones técnicas de las distintas tecnologías de comunicación inalámbrica, se procederá a trabajar con la tecnología LoRa, ya que se encuentra orientado en el mundo del IoT y presenta mejores características, necesarias para la elaboración del proyecto, como son: menor consumo de energía, escalabilidad, fácil implementación y alto rango de alcance [23].

F. Aplicaciones con Dispositivos LoRa

a) Agricultura inteligente: estos dispositivos se están empleando para medir las condiciones ambientales que afectan a la producción de cultivos. Estudios han demostrado que el uso de sensores LoRa reducen el consumo de agua hasta un 50% en granjas, lo que permite maximizar el rendimiento y minimizar gastos [23].

b) Ciudades inteligentes: con el uso de estos sensores se puede realizar proyectos IoT como aparcamiento inteligente, iluminación, manejo de desechos, de esa manera se optimiza el personal, el tiempo y el dinero [23].

c) Salud inteligente: esta tecnología ayuda en el seguimiento de pacientes de alto riesgo las 24 horas del día, lo que garantiza la seguridad y salud de los pacientes. Ejemplo: Paciente con Alzheimer [23].

d) Control Industrial Inteligente: Los dispositivos lora son muy utilizados en la industria debido a su largo alcance y bajo consumo de energía, además ofrecen funciones de monitoreo continuo y análisis de datos [23].

e) Casas inteligentes & Edificios: Pueden optimizar el consumo de energía, detectar el peligro (mejorar la seguridad) y ofrecer comodidad en la vida diaria [23].

G. Internet De Las Cosas (IoT)

Es un sistema en el que máquinas, dispositivos y objetos con identificadores únicos se interrelacionan, transfiriendo datos sobre una red sin requerir de interacciones humanas directas [24]. El acceso a estos dispositivos se los puede realizar de manera remota, al asignarle una dirección IP específica a cada uno de ellos [13].

H. ThingSpeak

La plataforma de análisis de ThingSpeak permite recopilar y almacenar datos de sensores en la nube y desarrollar aplicaciones de IoT, además, ofrece varios servicios como agregar alertas, visualizar y analizar flujos de datos en vivo en la nube. [25]

Existe una gran cantidad de proyectos que se pueden realizar con los servicios que ofrece esta plataforma, como monitorizar de forma remota y en tiempo real la calidad del aire, el consumo energético, el tráfico vehicular, entre otros.

III. METODOLOGÍA

A. Introducción

La implementación del sistema para la detección temprana de incendios está compuesta por una red de 3 nodos sensoriales, dividida por dos secciones que son el Hardware y el Software. El software consta de dos partes; la primera es el código de programación, el cual controla el microprocesador y la segunda está en la nube (ThingSpeak), donde se almacena los datos obtenidos cada 20 segundos.

El Hardware está compuesto por un grupo de sensores capaces de detectar cualquier anomalía en el ambiente, además, posee un sistema de comunicación inalámbrico

(LoRa) de largo alcance para la transmisión de datos. El dispositivo que estará en contacto con el medio ambiente es llamado “Nodo”, este es el hardware encargado de realizar las mediciones de ubicación por GPS, lectura de parámetros ambientales mediante sensores electrónicos y encargado de enviar datos por comunicación LoRa hacia el Gateway. El diagrama del proyecto se representa en la Figura 2.

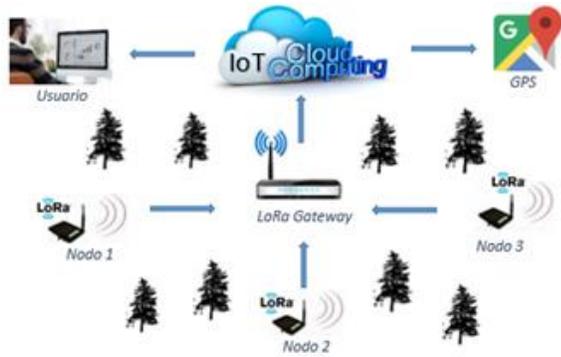


Fig. 2. Diagrama de comunicación de la red sensorial.

B. Hardware del Equipo Hawk

El hardware o nodo del sistema se compone de varios elementos como: sensores, tarjetas de comunicación inalámbrica, tarjetas PCB, router, microcontroladores y circuitos de alimentación.

a) Esquema General Del Hardware: El sistema propuesto se compone de una red sensorial de 3 nodos, distribuidos de manera estratégica con el fin de detectar un incendio forestal mediante las mediciones de las siguientes variables ambientales: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), temperatura, velocidad y dirección del viento, para la detección de incendios forestales. Las lecturas de los sensores son enviadas hacia un router principal (Gateway) para luego ser transmitidas hacia una plataforma en internet (ThingSpeak), donde se procesará la información.

La comunicación entre los nodos y el Gateway se da mediante la tecnología LoRa y la transmisión del Gateway hacia la plataforma de datos (ThingSpeak) se realiza a través de Wifi/Ethernet o red celular 3G/4G. La arquitectura del proyecto se observa en la Figura 3.



Fig. 3. Arquitectura general del sistema.

Cada nodo cuenta con sensores de temperatura, monóxido de carbono, dióxido de carbono, anemómetro (velocidad del viento), veleta (dirección del viento) y GPS. Cada sensor se conecta directamente a un módulo Shield de Dragino, que se encuentra sobre una placa de procesamiento (Arduino Uno), la cual está alimentada mediante un banco

de baterías. En la Figura 4 se representan los elementos del nodo.

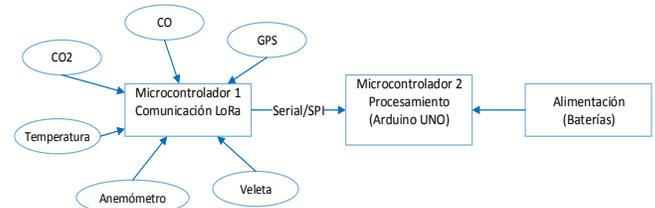


Fig. 4. Esquema del nodo.

b) Descripción De Los Componentes Del Hardware:

El nodo a nivel físico está compuesto por 3 tarjetas o capas, con funciones específicas, su diseño se realizó de forma estructurada, con la finalidad de que las tarjetas sean modulares o Shield entre ellas.

La primera capa está compuesta por la tarjeta Arduino Uno, la cual se muestra en la Figura 5. Esta tarjeta consta de 14 pines I/O digitales y 6 pines de entradas analógicas, además, es la encargada de procesar los datos y energizar los sensores, ya que dispone de un convertidor de voltaje en su entrada de 7-12VDC Vin a 5 y 3.3Vout [27].



Fig. 5. Hardware de la Primera Capa (Arduino Uno) [27].

La segunda capa está compuesta por la tarjeta LoRa GPS/Shield de Dragino mostrada en la Figura 6. La tarjeta consta de dos elementos esenciales que son: un sensor de GPS y un módulo LoRa Bee v1.0 para la comunicación inalámbrica, este módulo trabaja a una frecuencia de 915MHz, además, tiene dos conectores de tipo SMA para antenas (GPS y LoRa) [28]. La función específica de esta tarjeta es enviar por serial tramas de GPS hacia el Arduino y luego transferir dicho paquete por comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) hacia el módulo LoRa.



Fig. 6. Hardware de la Segunda Capa (Lora GPS/Shield) [28].

En la Figura 7 se observa la tercera capa, la cual está conformada por una placa PCB (Printed Circuit Board) diseñada en tipo Shield, realizada en el software de Isis Proteus 8 Professional. Para mayor seguridad eléctrica, la tarjeta cuenta con zócalos hembra a los cuales se conectan diferentes componentes electrónicos como: sensores, alimentación (baterías), filtros pasa bajo, ideales para eliminar el ruido en las entradas analógicas, planos de masa (tierra) para eliminar interferencias, fusible para eliminar posibles picos de corriente, y de esa manera proteger las 3 capas, además contiene una salida digital para un led

indicador de envío y recepción de datos entre la comunicación Nodo – Gateway.

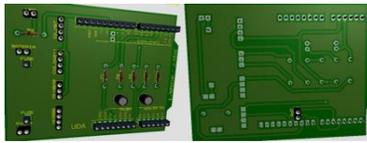


Fig. 7. Tercera Capa Modelo 3D. Cara frontal y posterior.

En la Figura 8 se contempla el resultado del diseño del PCB, su objetivo es enlazar todos los sensores y alimentación, hacia los eslabones inferiores (capa 1 y 2). El lado posterior del PCB contiene un par de peinetas hembra destinadas a la conexión del GPS entre la capa 3 y 2, a su vez dispone de pines machos para la unión entre estas capas.

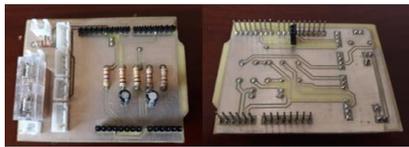


Fig. 8. Placa PCB (Cara Frontal y Posterior).

La Tabla II muestra la distribución de las conexiones de hardware entre la capa 1, 2 y 3. La primera columna corresponde a la capa 1 perteneciente a Arduino Uno, en la segunda columna está la capa 2 correspondiente a Dragino y en la tercera capa se encuentra el PCB.

TABLA II. ESQUEMA DE CONEXIONES ENTRE CAPAS

Capa 1	Capa 2	Capa 3
Pin Analógico A0	Pin Analógico A0	Sensor Monóxido de Carbono
Pin Analógico A1	Pin Analógico A1	Sensor Dióxido de Carbono
Pin Analógico A2	Pin Analógico A2	Sensor de Dirección de Viento
Pin Digital 9	Pin Digital 9	Sensor de Temperatura
Pin Digital 3	Pin Digital 3	S. Velocidad Viento
SERIAL SOFTWARE (RX, TX)	GPS RX GPS TX	GPS RX Pin Digital 5 GPS TX Pin Digital 4
SPI MISO Pin Digital 11 y 12	Comunicación LoRa	-----
Pin Digital 12	Pin Digital 12	Led Indicador Tx/Rx LoRa
Plug Vin Arduino	-----	Jack Alimentación 12V

c) Gateway LoRa (LG01-N): Es un equipo LoRa Gateway de solo canal, es decir frecuencia única, que sirve para controlar el tráfico proveniente desde una red LoRa hacia internet por medio de Wifi, Ethernet o celular 3G/4G. En el Gateway los usuarios LoRa (Nodos) pueden enviar datos a larga distancia y con una alta inmunidad al ruido, además, puede soportar una red de hasta 300 nodos conectados a él, lo que hace a la red muy escalable para futuras implementaciones [29].

El Gateway de la Figura 9 dispone de dos comunicaciones inalámbricas, una comunicación LoRa y

una comunicación Wifi, además posee un procesador de 400Mps + Memoria Ram de 16Mb, entradas RJ45 para conectar cable de red y un puerto Usb [29].



Fig. 9. Gateway LoRa (LG01-N) [29].

C. Sensores del Nodo Hawk

a) Sonda de Temperatura (DS18B20): Esta sonda es un sensor digital que permite medir un amplio rango de temperaturas entre [-55 °C, + 125 °C], con una resolución de 12 bits y una medición precisa [30].

b) Sensor MQ-7 monóxido de carbono (CO): El sensor MQ7 es ideal para detectar concentraciones de monóxido de carbono (CO) en el aire. Este sensor detecta concentraciones de 50 a 4000 ppm (partes por millón), además posee de un tiempo de calentamiento: 60s (5v) y 90s (1.4v) [32].

c) Sensor MQ-135 de dióxido de carbono (CO2): El sensor MQ-135 puede detectar concentraciones de dióxido de carbono en el rango de 10 a 200 ppm. Para una correcta lectura de datos, el sensor tiene un tiempo de calentamiento (20s), a partir del cual estará listo para detectar el CO2 [33].

d) Estación Meteorológica (WS-3000): La estación meteorológica de la Figura 10 consta de 3 sensores: anemómetro, veleta y pluviómetro. En el proyecto se utilizó los dos primeros sensores: anemómetro y veleta.

El anemómetro es un instrumento utilizado para medir la velocidad del viento de forma instantánea. Consiste en un interruptor que se cierra durante un periodo corto de tiempo cuando el anemómetro completa un giro, por lo que la salida es una señal digital, cuya frecuencia será proporcional a la velocidad del viento en km/h [30].

La veleta (Wind Vane) se utiliza para medir la dirección del viento; la cual gira sobre una plataforma compuesta con una red de 8 resistencias conectadas a 8 interruptores normalmente abiertos. Pueden cerrarse 1 o 2 interruptores a la vez, lo que permite obtener hasta 16 posiciones diferentes (equivalente a una resolución de 22.5°) [30].



Fig. 10. Estación meteorológica WS3000 [30].

D. Alimentación del Nodo Hawk

El nodo está compuesto por 6 baterías ion-Litio de 6800mAh a 3.7V conectadas en circuito mixto, es decir serie y paralelo como se observa en la Figura 11, logrando un banco de baterías de 20400mAh a 8.4V.

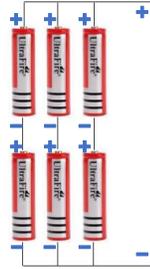


Fig. 11. Conexión Serie-Paralelo

Existen 3 ramales de corriente en paralelo, cada ramal consta de dos baterías es decir el voltaje se suma, dando (8.4V), pero la corriente es la misma (6.8A). Con esta explicación se deduce que la energía total en vatios hora (Wh) es igual a:

$$Et = 57.12Wh \times 3 = 171.36Wh \quad (1)$$

Según la corriente de consumo medida desde la fuente hacia el sistema que es de 0.4A, se puede calcular la energía de consumo que es igual a:

$$EConsumo = 8.4V \times 0.4A = 3.36 Wh \quad (2)$$

E. Estructura Física del Nodo Hawk

Los nodos del presente proyecto se denominan Hawk, que en español significa “Halcón”. Se otorgó ese nombre por un ave que existe en las vastas zonas de Australia. Esta ave tiene como objetivo localizar el foco de un incendio, para así recoger un objeto en llamas y llevarlo hasta su escondite. De esa manera el Halcón logra proteger su nido de otros depredadores [31]. El diseño exterior de los nodos se observa en la Figura 12.



Fig. 12. Nodos del equipo.

Para el diseño de la estructura del nodo se consideró varios aspectos como: el aspecto ambiental y el espacio necesario para el cableado, el switch, las baterías, los conectores sensoriales, el puerto USB, el led indicador, la tarjeta microcontrolador, la tarjeta de comunicación LoRa, la tarjeta PCB para conexiones Entradas/Salidas, la antena GPS y la antena de comunicación LoRa.

Con el objetivo de realizar un nodo totalmente desmontable, el material elegido fue PVC, con el cual se elaboraron dos estructuras desmontables. A continuación, se detallará cada imagen mostrada en la Figura 13.

- La parte interna posterior del nodo se utilizó para colocar el banco de baterías que alimenta el sistema.
- En la parte frontal se colocaron tres tarjetas (tarjeta microcontrolador, tarjeta de comunicación y tarjeta de conexiones PCB).
- La parte inferior de la estructura consta de 3 conectores GX de 4 pines y un conector GX de 3 pines, en donde se coloca el sensor de temperatura DS18B20, el sensor de CO MQ7, el sensor de CO2 MQ135, y la estación meteorológica WS3000.
- El diseño también consta de un puerto serial con el fin de modificar el código mediante la conexión de un cable USB a la computadora, además, se incorporó un Led indicador con doble función: para ubicación del GPS y envío de datos.
- En la cara lateral derecha del nodo se dejaron 2 conectores (SMA) para colocar la antena de comunicación LoRa y la antena GPS.
- Como parte de la estructura del nodo, las uniones de los sensores se fabricaron con conectores GX hembra y cable UTP Categoría 6.



Fig. 13. Estructura del nodo.

En la Tabla III se observa los sockets que contiene cada nodo, para conectar sus respectivos sensores ambientales. Además de mostrar las conexiones en esta tabla, los nodos también contienen etiquetas que se pueden visualizar en la Figura 13 numeral 3, para evitar confusión al momento de la conexión.

TABLA III. CUADRO DE CONEXIONES PARA LOS NODOS HAWK.

Sensor	Sockets
--------	---------

	A	B	C	D
Sensor de CO (MQ-7)	✓			
Sensor de CO2 (MQ-135)		✓		
WS-3000(anemómetro+ veleta)			✓	
Sonda de temperatura (DS18B20)				✓

F. Software Del Nodo Hawk

a) *Esquema General del Software:* La implementación del código está elaborada paso a paso con el objetivo de optimizar recursos del microcontrolador. El código ocupa el 68% (18848 bytes) del espacio máximo que puede soportar la memoria de dicho microcontrolador.

El código inicia declarando las librerías necesarias a la memoria del microcontrolador, luego se inicializan las variables para cada uno de los sensores. Se dispone de métodos diferentes para realizar la lectura de los sensores analógicos y digitales. Después de iniciar variables se comprueba que la comunicación LoRa por SPI esté activa, de serlo así, continúa el flujo de código. Luego, se obtienen los parámetros de ubicación, se asignan los datos de GPS al buffer o llamado en el código como Payload (Vector de 32 posiciones). A continuación, se procede con la lectura de los sensores, los cuales se guardarán en el mismo vector Payload. Finalmente, el sistema envía el Payload por comunicación LoRa a 915 MHz al Gateway. Realizado el proceso anterior, el código reinicia su ciclo, pero esta vez sin obtener parámetros de GPS.

El diagrama de flujo para la implementación del código se representa en la Figura 14.

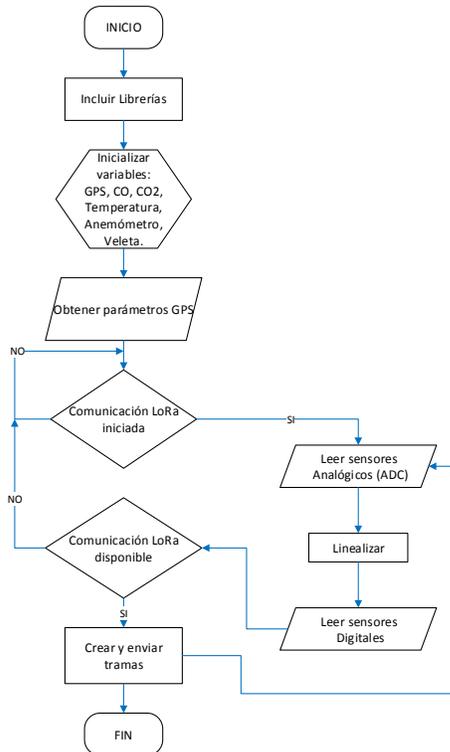


Fig. 14. Diagrama de flujo general del software.

Otra forma de representar el esquema general de software es por máquinas de estados o “FSM – Finite State Machine”. Al hacer el código por máquina de estados se logra efectividad en el flujo del código. La Figura 15 representa los algoritmos de secuencia.

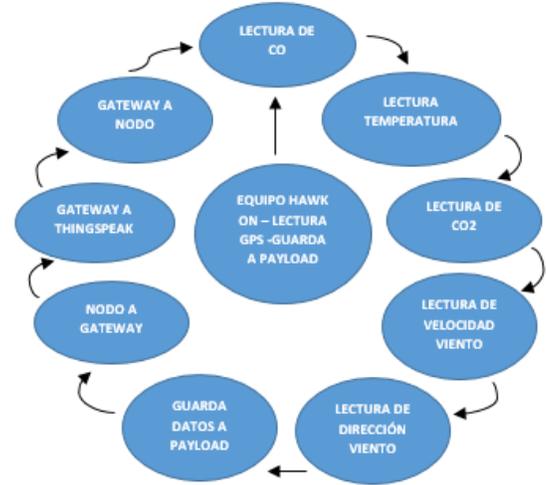


Fig. 15. Máquina de estado.

G. Programación de los Sensores (Analógicos y Digitales)

Para la programación de los sensores y de cada módulo se utilizó el IDE de Arduino, que es de código abierto y se programa en lenguaje C. Fue necesario incluir algunas librerías para realizar la lectura de los sensores, así como para realizar la comunicación LoRa, y obtener las coordenadas GPS.

a) Sensor de Temperatura

La obtención de datos del sensor de temperatura DS18B20 fue desarrollado gracias a las librerías <OneWire.h> y <DallasTemperature.h>. La librería <OneWire.h> indica que por un mismo bus de comunicación se puede controlar varios sensores de temperatura y la librería <DallasTemperature.h> es la encargada de obtener el dato de temperatura en grados Celsius calculada con ecuaciones físicas y matemáticas.

Antes de comenzar con el proceso de calibración del sensor DS18B20, se realizó una prueba de campo para observar el comportamiento del sensor de temperatura.

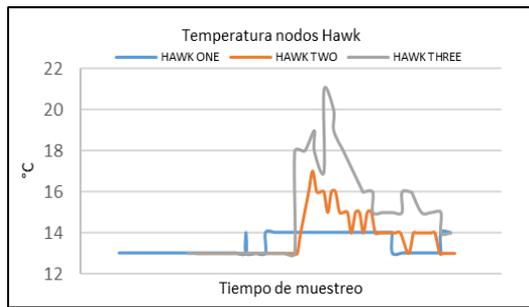


Fig. 16. Curva sin calibración del sensor de temperatura (DS18B20).

La Figura 16 demuestra que los sensores de temperatura presentan ciertas variaciones de amplitudes medidos en grados Celsius para los tres nodos, lo que implica que los sensores deben ser calibrados para obtener una medición correcta.

Calibración del Sensor de Temperatura (DS18B20).

Para calibrar este sensor únicamente se tuvo que ocupar 10 bits de resolución. Por ejemplo, este sensor es digital y dispone de 9 a 12 bits de resolución como se observa en la Tabla IV.

TABLA IV. BITS DE RESOLUCIÓN

Número en Binario	Bits de Resolución
1001	9
1010	10
1011	11
1100	12

El código de programación correspondiente a la calibración del sensor de temperatura se presenta en la Figura 17.

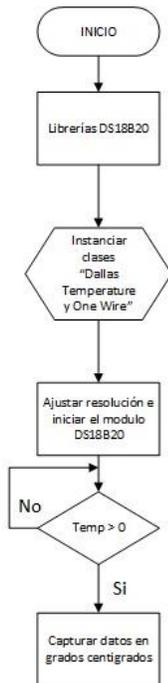


Fig. 17. Flujoograma de calibración del sensor DS18B20.

Una vez realizada la calibración por código, se procedió a realizar una prueba de ebullición del agua de los tres nodos Hawk junto a los nodos de Libelium, con lo que se obtuvo un comportamiento similar entre las curvas, lo que indica una calibración correcta de los sensores. Los resultados de dicha prueba se demuestran en la Figura 18.

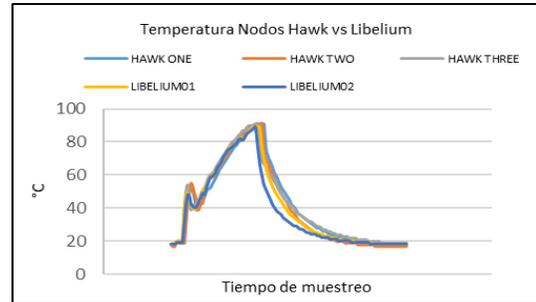


Fig. 18. Prueba ebullición del agua con calibración de sensores.

b) Sensor de Monóxido de Carbono MQ7

Para obtener los datos del sensor de monóxido de carbono MQ7 se ocupó un pin analógico del microcontrolador el cual tiene incluida un ADC junto a un multiplexor internamente. El ADC es de 10 bits y tiene una escala de 0 a 1024. Con los datos obtenidos del sensor, mediante código, se pudo linealizar con una curva dada por el DataSheet del sensor de forma que interactúe con varias partículas de humo y exprese una magnitud entre (50 a 4000) partes por millón (ppm) como se observa en la Figura 19 [34].

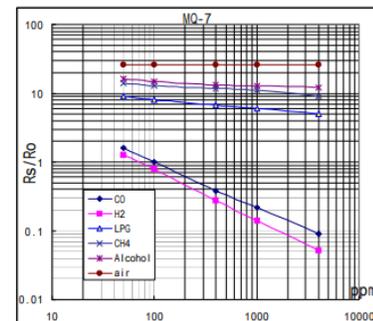


Fig. 19. Curva característica del sensor MQ-7 [34].

Antes de iniciar el proceso de calibración del sensor de Monóxido de Carbono, se realizó una prueba de campo a baja escala, obteniendo altas variaciones entre las mediciones de los sensores MQ7, así como se observa en la Figura 20, por lo cual es necesario realizar una calibración de dichos sensores.

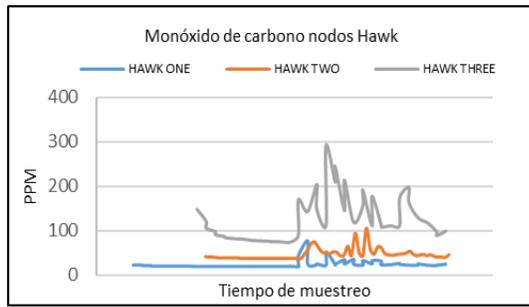


Fig. 20. Curvas Sin Calibración de CO-MQ7.

Calibración del Sensor MQ7

Para calibrar de una manera lógica el sensor de monóxido de carbono MQ7 se procede a analizar la curva del DataSheet. La Figura 21 muestra la curva en Excel con diferentes puntos para tener la escala correcta. A este gráfico se le invirtió los ejes para tener despejada la ecuación y de esa manera calibrar el sensor de monóxido de carbono en estado de reposo.

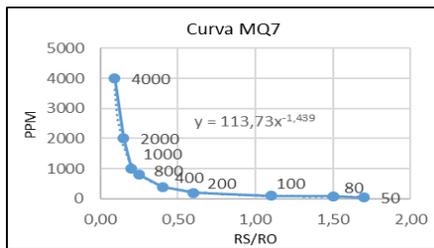


Fig. 21. Curva del sensor MQ7.

Las siglas de los ejes de la Figura 21 se detallan a continuación:

- Rs = valor analógico que lee el microcontrolador.
- Ro = valor de calibración en estado de reposo.
- PPM = partes por millón del gas en cuestión.
- Rs/Ro = valor necesario para la obtención de PPM según la ecuación (4).

La ecuación descrita por la Figura 21 es igual a:

$$Y = 113,73 X^{-1,439} \quad (3)$$

Donde, $X = Rs/Ro$

y,

$$Y = PPM$$

Quedando,

$$PPM = 113,73 [(Rs/Ro)]^{-1,439} \quad (4)$$

De esa manera se obtuvo la escala correcta en PPM de monóxido de carbono, lo cual se implementó en el código para los tres nodos del equipo. El flujograma de la Figura 22

explica la implementación del código de calibración en el microcontrolador.

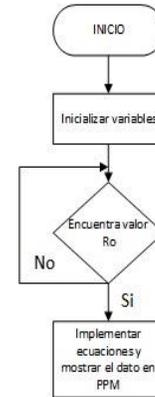


Fig. 22. Flujograma de calibración del sensor MQ7

Realizado el código para la calibración del sensor MQ7, se ejecutó una prueba con los tres nodos en un mismo lugar, obteniendo como resultado el mismo patrón gráfico en los tres nodos, como se aprecia en la curva de la Figura 23, lo que comprueba la correcta calibración de los sensores MQ7.

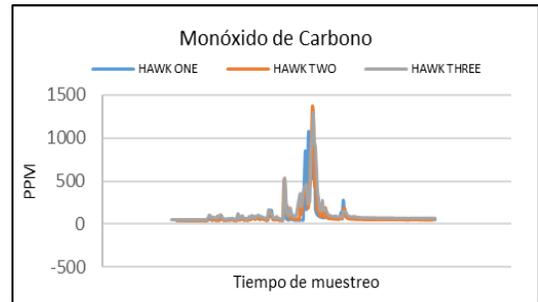


Fig. 23. Curva con calibración del sensor MQ7.

c) Sensor de Dióxido de Carbono MQ135

Para obtener la lectura correcta del sensor de dióxido de carbono MQ135 se tomó como referencia la curva de la hoja de datos (DataSheet) a los cuales el sensor es altamente sensible, en la Figura 24 se observa que el sensor puede medir entre (10 a 200) ppm [35].

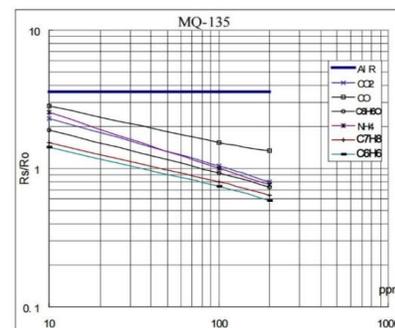


Fig. 24. Curva característica del sensor MQ135 [35].

Antes de comenzar con la calibración del sensor de dióxido de carbono primero se realizó una prueba de campo para examinar el comportamiento del sensor de CO2,

logrando como resultado la curva de la Figura 25, la cual indica que los sensores MQ135 requieren ser calibrados, ya que presentan distintas mediciones de CO2.

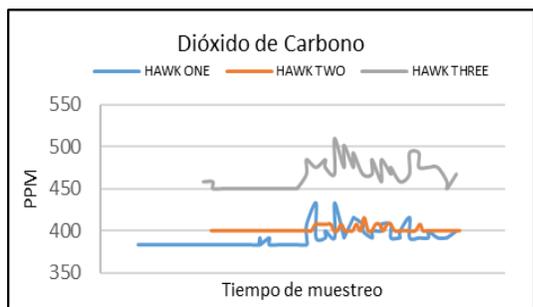


Fig. 25. Curvas sin Calibración del CO2-MQ135.

Calibración de Sensor MQ135

La calibración del sensor de dióxido de carbono MQ135 es similar a la calibración del sensor de monóxido de carbono MQ7. Para fines prácticos se muestra la curva y la ecuación utilizada para la respectiva calibración, como se puede apreciar en la Figura 26.

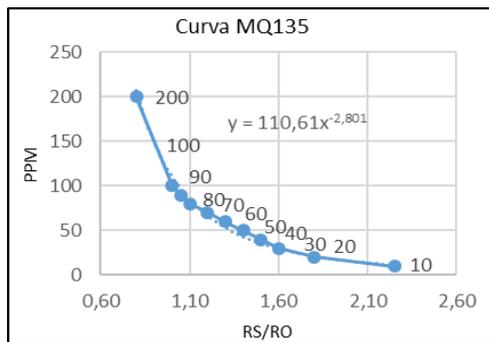


Fig. 26. Curva MQ-135 a implementar.

La ecuación que detalla la Figura 26 viene expresada por:

$$PPM = 110,61 [(RS/Ro)]^{-2,801} \quad (5)$$

El flujograma de la calibración de la Figura 22 que explica el funcionamiento del sensor de monóxido de carbono es el mismo para el sensor de dióxido de carbono.

Realizado el proceso para calibrar el sensor, se realizó la misma prueba detallada en la calibración del sensor de monóxido de carbono, comprobando que la ecuación (5) utilizada obtiene resultados comparables respecto a la formación de patrones gráficos y amplitudes para los sensores de Dióxido de Carbono del equipo, los cuales se pueden visualizar en la Figura 27.

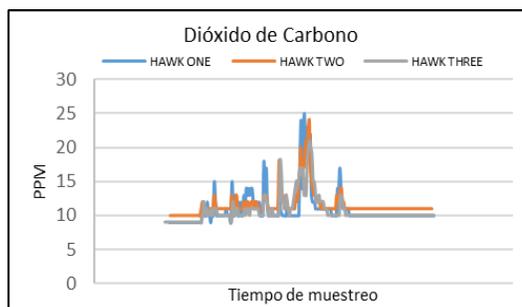


Fig. 27. Curva con calibración del sensor MQ135.

d) Sensor de Velocidad de Viento (Anemómetro).

Para la lectura del anemómetro (velocidad del viento en km/h) en el microcontrolador se ocupó una función llamada “millis” la cual recupera y devuelve el tiempo desde que el microcontrolador se encendió. Con esta función se obtuvo el tiempo por cada giro del anemómetro y para esto se ocupó una interrupción asignada en el pin digital del microcontrolador, dando como resultado la velocidad del viento por segundo en 2.4 km/h.

La ecuación de velocidad debe partir de la fórmula de velocidad angular para obtener velocidad lineal.

$$V = r \times w \quad (6)$$

V: Velocidad Lineal, en m/s

r: Radio, en metros

W: Velocidad Angular, en rad/s

En donde las RPM se pueden sustituir por “w” por ser la misma velocidad orientada al giro del anemómetro [36].

$$V = r \times RPM \times 0.10472 \quad (7)$$

El factor 0.10472 representa el radio del anemómetro que al multiplicar con las revoluciones dará la velocidad angular.

En la Figura 28 se explica la implementación del código en el microcontrolador para la correcta lectura de datos de velocidad.



Fig. 28. Flujograma del Anemómetro

Calibración del Anemómetro

Para calibrar el sensor de velocidad de viento de la estación meteorológica WS3000, se requiere contrastar con otro equipo, en este caso se comparó con 2 equipos: Libelium y un anemómetro digital HP856A. Todos ellos cuentan con lectura en kilómetros por hora. La fotografía de los equipos se presenta en la Figura 29.



Fig. 29. Equipo Libelium y Anemómetro Digital

Esta prueba se realizó con una secadora de cabello que tiene dos potencias en su configuración. Los parámetros de calibración fueron los siguientes:

- Que se mantenga a una misma distancia la secadora del equipo.
- Que mantenga una misma potencia de ventilación para el equipo.
- Periodo de muestreo de 1 segundo.
- 60 muestras en total para cada equipo.

El resultado de calibración para los 3 equipos se indica en la Figura 30, en donde el equipo de Libelium alcanza las amplitudes máximas, mientras que el anemómetro digital y el anemómetro del equipo Hawk tienen una diferencia de 1 a 2 km/h. Libelium tiene su medición en km/h, pero tuvo un desfase en amplitud de un factor de división de 1.6 respecto al equipo Hawk y al anemómetro digital. El desfase existente entre mediciones se debe a que las líneas de flujo

del viento no llegan de la misma manera al aspa del anemómetro.

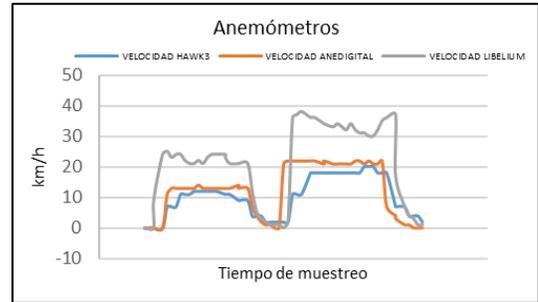


Fig. 30. Calibración del sensor del viento con 3 equipos.

e) Sensor de Dirección del Viento (Veleta).

Para la lectura de datos de la veleta se utilizó la hoja de datos técnicos proporcionado por Libelium, en donde manifiesta que el voltaje del sensor varía con cada giro de la veleta y esto se da gracias a la resistencia equivalente de la veleta y a una resistencia de 10 kΩ colocada para formar un divisor de voltaje alimentado a 5V [30].

Analizando la información de la primera columna de la Tabla V se ocupó el voltaje correspondiente a la orientación del sensor, en el cual fue necesario un factor de multiplicación de 1.5V (5v/3.3v) para obtener una lectura a 5V. El voltaje a utilizar se indica en la siguiente Tabla V.

TABLA V. VOLTAJE DE LA VELETA

Voltaje	Factor	Volt Utilizar	Orientación
2.53	1.51	3.82	N
1.31	1.51	1.97	NNE
1.49	1.51	2.24	NE
0.27	1.51	0.40	ENE
0.3	1.51	0.45	E
0.21	1.51	0.31	ESE
0.59	1.51	0.89	SE
0.41	1.51	0.61	SSE
0.92	1.51	1.38	S
0.79	1.51	1.19	SSW
2.03	1.51	3.06	SW
1.93	1.51	2.91	WSW
3.05	1.51	4.60	W
2.67	1.51	4.03	WNW
2.86	1.51	4.32	NW
2.26	1.51	3.41	NNW

Calibración de la Veleta

La dirección del viento es un factor importante al momento de un incendio forestal, por ello es necesario que la obtención de este parámetro sea correcta. Se utilizó la estación meteorológica WS3000 del equipo de Libelium y del equipo del proyecto para verificar la exactitud en la medición. Para ello se realizó una calibración manual, colocando las dos estaciones meteorológicas en las diferentes direcciones (Norte, Noreste, Este, Sureste, Sur, Suroeste, Oeste y Noroeste).

La rotación tiene como referencia el eje X en sentido anti horario, de esta manera cada dirección corresponde a un

valor en grados sexagesimales como se muestra en la Tabla VI.

TABLA VI. DIRECCIÓN DE LA VELETA EN GRADOS SEXAGESIMALES.

Dirección	Nodo Hawk	Nodo Libelium
Norte	90°	90°
Noreste	45°	45°
Este	360°	360°
Sureste	315°	315°
Sur	270°	270°
Suroeste	225°	225°
Oeste	180°	180°
Noroeste	135°	135°

Como primer punto de calibración se realizó la comparación con las dos estaciones meteorológicas y una brújula obtenida mediante una aplicación celular, como se visualiza en la Figura 31, donde se comprobó que la orientación dada es correcta.



Fig. 31. Calibración mediante Smart Phone.

La calibración de las estaciones WS3000 fue satisfactoria como se puede apreciar en la Figura 32. El desfase existente en el eje x (Tiempo) se debe a los tiempos desplazados en llegar los datos desde el nodo al Gateway lo cual tiene un error mínimo, sin embargo, los ángulos de dirección son los mismos.

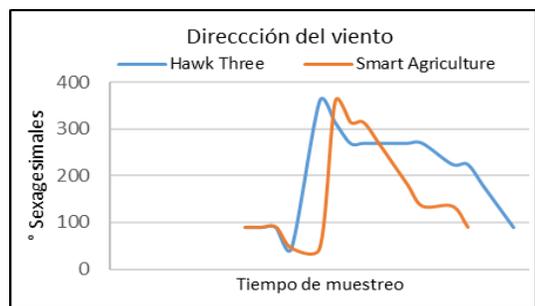


Fig. 32. Calibración Dirección del Viento.

f) Sensor de Posicionamiento Geográfico GPS.

Lo primero que se requiere es tener una correcta comunicación serial entre el microcontrolador y el sensor de GPS. Luego se inicializa la comunicación serial con una velocidad de 9600 baudios. El método calculará la posición del sensor mediante parámetros ya implícitos en la librería TINYGPS como son “gps.f_get_position (lat, lon, alt)”. Para capturar dichos datos se utilizó una cadena de caracteres tipo String con 6 decimales de precisión para la

coordenada GPS. En caso de no encontrar el GPS mostrará en el monitor serial un “*”. El código correspondiente para la obtención de las coordenadas GPS se manifiesta en la Figura 33.

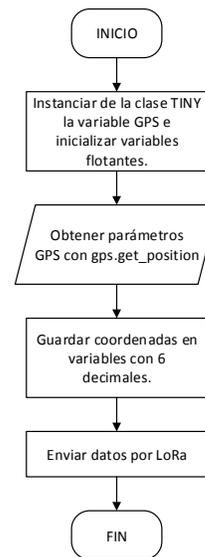


Fig. 33. Flujograma GPS

En la Figura 34 se aprecia el posicionamiento de los tres nodos del equipo (“-2.916218 -79.000421”, “-2.916245 -79.000496”, “-2.916291 -79.000402”), los cuales están en la misma ubicación comparada mediante Google Maps (“-2.916173 y -79.000442”), lo que afirma que el software y hardware respecto al GPS de los nodos es correcto.

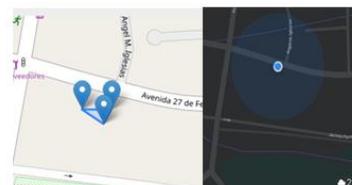


Fig. 34. Ubicación GPS Comparativa.

g) Obtención de Distancia Basada en GPS.

Para calcular la distancia entre dos puntos sobre un plano, se utilizó la fórmula de Haversine que consiste en utilizar las coordenadas (latitud + longitud) y el radio de la tierra, en este caso se utilizó el radio ecuatorial que es 6378km [37]. De esa manera se puede obtener la distancia correcta a la que se encuentra ubicado el nodo y el Gateway.

La fórmula de Haversine es:

$$\begin{aligned}
 R &= 6378\text{km} \\
 \Delta\text{Lat} &= \text{Lat}2 - \text{Lat}1 \\
 \Delta\text{Long} &= \text{Long}2 - \text{Long}1 \\
 a &= \sin^2\left(\frac{\Delta\text{Lat}}{2}\right) + \cos(\text{Lat}1) \times \cos(\text{Lat}2) \times \sin^2\left(\frac{\Delta\text{Long}}{2}\right) \\
 c &= 2 \times \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \\
 D &= R \times c \tag{8}
 \end{aligned}$$

h) ThingSpeak-Comunicación (Gateway-Servidor)

El Gateway cumple la función de cliente/servidor, se comporta como cliente para recibir los datos de cada nodo, y como servidor para enviar mediante Wifi/Ethernet los datos obtenidos hacia la plataforma de ThingSpeak, en donde se podrá monitorizar los diferentes parámetros. En la figura 35 se presenta un diagrama de comunicación.



Fig. 35. Comunicación Gateway - Nube (ThingSpeak).

En la programación del Gateway se deberá incluir varias librerías necesarias para la transmisión y recepción de datos, como: <RH_RF95.h> que es indispensable para la comunicación LoRa a una frecuencia de 915Mhz, <ThingSpeak.h> la cual facilita el envío de datos a la nube. El Gateway separa los datos de cada nodo y los envía a cada campo (Field) creado en ThingSpeak, para ello se necesita la interfaz de programación de aplicaciones (API), la misma proporciona una clave y un ID del canal para establecer los datos en la plataforma. El flujograma de la comunicación Gateway- ThingSpeak se presenta en la Figura 36.

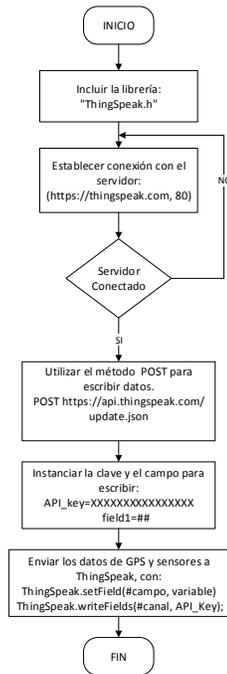


Fig. 36. Flujograma Gateway- Nube (ThingSpeak).

En la Figura 37 se presenta la interfaz de ThingSpeak con los campos pertenecientes a los datos de los diferentes sensores.

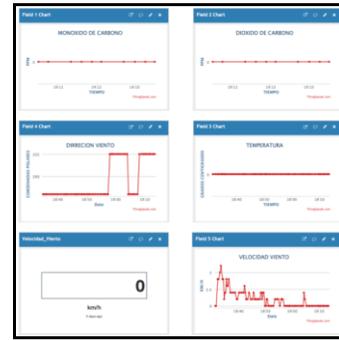


Fig. 37. Datos de Interfaz de ThingSpeak.

Existen 7 Campos o “Fields” en la plataforma de ThingSpeak, los cuales guardarán y graficarán los datos pertenecientes al Nodo que realizará el envío. En la Tabla VII se detalla cada campo y a qué variable pertenece.

TABLA VII. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPOS EN THINGSPEAK

Campo	Descripción
1	Monóxido de Carbono
2	Dióxido de Carbono
3	Temperatura
4	Dirección del Viento
5	Velocidad del Viento
6	Latitud GPS
7	Longitud GPS

La plataforma brinda herramientas para desarrolladores web, con un complemento o más conocido como “Plugin”. Con el lenguaje de JavaScript se creó el campo “Área Nodos” y “Ubicación Nodo” como se muestra en la Figura 38, donde de forma gráfica se visualiza de mejor manera los datos de Latitud y Longitud que enviará el Nodo hacia el Gateway.

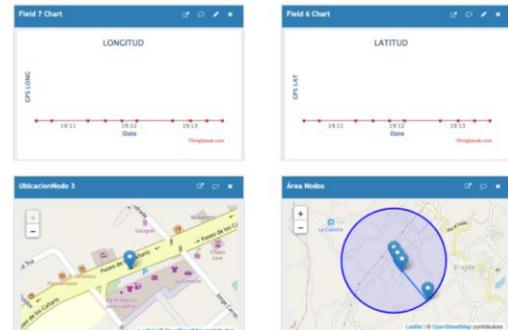


Fig. 38. Mapas con GPS.

También se desarrolló un complemento para observar la dirección del viento. La aguja de color negro es el selector del punto cardinal. Por ejemplo, en la Figura 39 se observa el Sur-Oeste.



Fig. 39. Brújula de la Plataforma ThingSpeak.

ThingSpeak permite la creación de alarmas para cualquier dato que ingrese a la nube. En este proyecto se implementaron 4 alarmas: de monóxido de carbono, dióxido de carbono, temperatura y velocidad del viento. La alarma se activa cuando supera, es igual, o es menor a cierto umbral definido dentro de la configuración de la misma. En la Figura 40 se observa que una alarma de velocidad del viento se activa cuando supera cierto umbral en km/h.

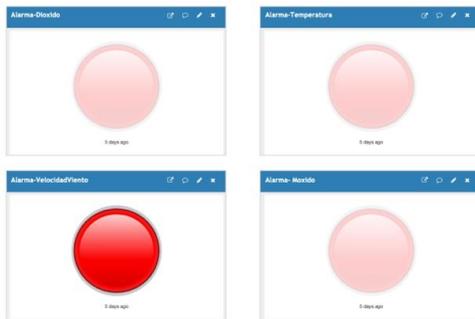


Fig. 40. Alarmas ThingSpeak.

H. Comunicación del Nodo Hawk al Gateway

a) Envío y Recepción de datos mediante comunicación LoRa.

Para realizar el envío y recepción de datos mediante la red LoRa se necesita instanciar la clase RH_RF95 que sirve para enlazar la comunicación entre los dispositivos finales (nodo) y el router principal (Gateway). Los datos se envían cuando los equipos de la Figura 41 se encuentran enlazados, es decir que trabajen a la misma frecuencia y modulación. Para confirmar la llegada de datos, el router envía un ACK (acuse de recibo) al origen (nodo).

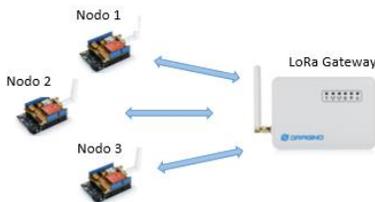


Fig. 41. Comunicación LoRa Cliente (Nodo) – Servidor (Gateway).

En el IDE de Arduino para cada nodo se realizó la respectiva programación, estableciendo la frecuencia de comunicación LoRa a 915Mhz, con una potencia de transmisión de 13dbm y un ancho de banda de 125Kbits/s.

El flujograma de la Figura 42, indica la lógica aplicada para enviar datos desde el nodo hacia el Gateway.

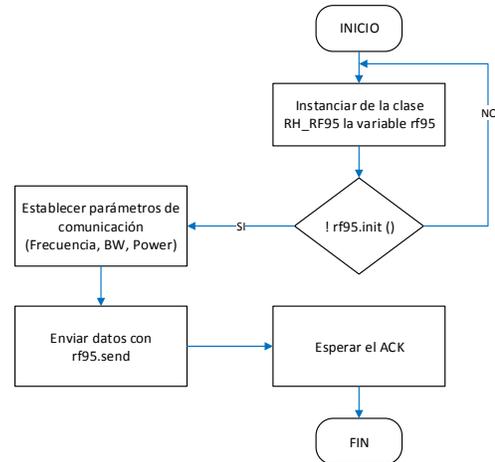


Fig. 42. Diagrama de envío de datos mediante comunicación LoRa.

Cuando el enlace entre el nodo y el router de Dragino se ha establecido correctamente se confirmará con un destello de luz de color azul, el cual parpadeará por un segundo si el dato se envió satisfactoriamente.

b) Tramas de Datos

La trama está dividida en 3 partes como se muestra en la Figura 43, que son: encabezado, paquete y tráiler. Cada una posee diferentes esquemas de información para llegar hacia el destino. Cada trama puede ser representada en modelo OSI o TCP/IP. Generalmente en el modelo OSI, la trama de información se construye desde la capa 1 hasta la 3, en la cuales son clasificadas de la siguiente forma: Capa Física, Capa de Enlace y Capa de Red.

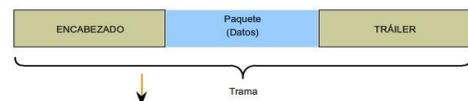


Fig. 43. Trama de Datos Nivel Físico [38].

c) Envío de Datos

En el presente proyecto al ser datos únicamente de sensores se trabajó a nivel de bits para mejorar los recursos de la comunicación inalámbrica, para ello se ocupó multiplicaciones, divisiones y desplazamientos de bits para formar las cadenas de bytes o más comúnmente llamado “arrays”. En la Figura 44 se indica la trama de datos.

ID	GPS	S1	S2	S3	S4	S5	FN
----	-----	----	----	----	----	----	----

Fig. 44. Trama de Datos.

Simbología de la Trama de datos.

ID: Número único que es representado por cada nodo.

GPS: latitud y longitud. Variables Strings.

S1, S2, S3, S4, S5: Información de los sensores. Es el dato que representará cada sensor de la magnitud física medida con una variable entera.

FN: Fin de Trama. Viene representada por el último dato del sensor que enviará el nodo hacia el Router.

ID-Identificador Único

Para el ID del nodo se trabajó con 3 bytes, los cuales son representados por la Figura 45. Este ID en el Gateway, clasificará la información procedente del nodo hacia la nube (ThingSpeak).

```
Data [0] = 00000001;
Data [1] = 00000001;
Data [2] = 00000001;
```

Fig. 45. Identificador de la trama de datos.

Datos Sensores

Para Codificar los datos de los sensores se debe realizar los siguientes pasos:

- Saber cuántos octetos se necesitan para enviar el dato completo.
- Después se debe convertir el dato del sensor en binario o hexadecimal.
- Con un operador AND se multiplica bit a bit para que no se afecte el dato.
- Luego se envía todo el vector por comunicación LoRa.

En la Figura 46 se muestra el código de los pasos mencionados anteriormente.

```
payload[3] = (byte) ((valorCo & 0xFF0000) >> 16);
payload[4] = (byte) ((valorCo & 0x00FF00) >> 8);
payload[5] = (byte) ((valorCo & 0x0000FF));
```

Fig. 46. Codificación en Bytes.

Dónde,

ValorCo: Es el dato entero obtenido por el sensor.

&: Operación AND.

>>: Desplazamientos de bits hacia la derecha.

Payload []: Vector donde se almacenarán los datos.

GPS

Para encontrar las coordenadas GPS, primero se enciende el nodo; en caso de no tener un ángulo o línea de vista óptima, la antena del nodo con el satélite seguirá en un bucle infinito como se visualiza en la Figura 47.

```
Buscando GPS:
*****
Buscando GPS:
*****
Buscando GPS:
*****
Buscando GPS:
*****
```

Fig. 47. Serial Plotter Buscando GPS

Cuando la antena GPS tipo parche del nodo se enlace con unos de los satélites, mostrará el resultado como se observa en la Figura 48.

```
-- TRAMA GPS --
Encontro GPS
Latitud: -2.301843
Longitud: -78.116989
```

Fig. 48. Coordenadas GPS encontradas.

Ahora bien, para armar las tramas del GPS se utilizó dos variables de tipo String. Esto complicó el proceso al momento de trabajar con bits ya que el punto flotante o decimal al momento de transformar a bits se tenía que multiplicar por un número más grande como puede ser de tipo Long, para de esa manera obtener todos los decimales. Un problema que resultó de esto es que los decimales se perdían por defectos que tiene el compilador Arduino IDE, por ende, se ocupó el tipo de dato String para almacenar todo ese dígito.

Fin de Trama

El fin de trama viene interpretado como el último dato del sensor (Velocidad de Viento) que es enviado hacia el servidor, y de esta manera el servidor envía un ACK indicando que recibió la trama correctamente.

```
payload[12] = (byte) ((Velocidad & 0xFF));
```

Fig. 49. Fin de Trama.

d) Recepción de Datos

Antes de que el router inicie con su ejecución de código, tendrá que devolver un verdadero o falso para verificar si la comunicación rf95 está disponible, esto se dará si es que el router encuentra algún enlace a su alrededor en una frecuencia de 915Mhz, esta parte del código se indica en la Figura 50.

```
Boolean Enlace = false;
Enlace=rf95.available ();
If (Enlace == True);
```

Fig. 50. Estructura Condicional.

Si el valor de la variable “Enlace” es verdadero, entonces continuará con la secuencia de código, caso contrario seguirá buscando alguna comunicación a 915Mhz.

ID

Una vez que el Router recibe datos a 915Mhz, lo primero que hace es guardar en un buffer la información. Luego existe una estructura condicional que se indica en la Figura 51, la cual va a filtrar y catalogar qué nodo se enlazó con el router, esto se puede debido al ID que contiene cada nodo, el cual se representa en los 3 primeros bytes de la trama de datos. Luego de ello, el router procederá a la decodificación del buffer por algoritmos establecidos en el programa.

```

if ((buf[0] == 1) && (buf[1] == 1) && (buf[2] == 1))
{
  Descompresion_Bytes(1, buf);
}

```

Fig. 51. ID Decodificación.

Datos Sensores

Cuando el router distingue que nodo está enlazado, empieza a decodificar los datos; pues hará el proceso inverso de la codificación, pero teniendo en cuenta en qué posición del vector está alojada la información de cada sensor. En la Figura 52 se encuentra la decodificación a nivel de código implementado en el router.

```

numCO = data[3];
numCO = numCO << 8 | data[4];
numCO = numCO << 8 | data[5];

numCO2 = data[6];
numCO2 = numCO2 << 8 | data[7];
numCO2 = numCO2 << 8 | data[8];

Temp = data[9];

Direccion = data[10];
Direccion = Direccion << 8 | data[11];

Velocidad = data[12];

```

Fig. 52. Decodificación Sensores.

Fin de Trama

Luego de decodificar los datos y haberlos subido a la nube (ThingSpeak), el router envía un fin de trama, que para este caso será el mismo ID del nodo con el que se enlazó y trabajó durante ese intervalo de tiempo, como se aprecia en la Figura 53.

```

rf95.send(buf, len);
rf95.waitPacketSent();

```

Fig. 53. Fin de Trama.

Una vez realizadas las tramas de envío, en la Figura 54 se muestra una pequeña prueba de comunicación, en donde se visualiza los bits de ID y GPS que envía el nodo, y los bits que recibe el Gateway.

```

Bytes Enviados GPS Desde el Nodo:
4 4 4 2D 32 2E 33 30 31 38 34 33 2D 37 38 2E 31 31 36 39 38
Bytes Recibidos GPS Desde Router:
4 4 4 2D 32 2E 33 30 31 38 34 33 2D 37 38 2E
31 31 36 39 38

```

Fig. 54. Trama Completa Recibida.

Los caracteres expresados en la Figura 55 son números hexadecimales y son representados en lenguaje de código ASCII, los cuales ayudan a comprender la trama de datos enviada desde el nodo hacia el Gateway expuesta en la Figura 54.

Caracteres ASCII imprimibles					
32	espacio	64	@	96	-
33	!	65	A	97	a
34	"	66	B	98	b
35	#	67	C	99	c
36	\$	68	D	100	d
37	%	69	E	101	e
38	&	70	F	102	f
39	'	71	G	103	g
40	(	72	H	104	h
41	)	73	I	105	i
42	*	74	J	106	j
43	+	75	K	107	k
44	,	76	L	108	l
45	-	77	M	109	m
46	.	78	N	110	n
47	/	79	O	111	o
48	0	80	P	112	p
49	1	81	Q	113	q
50	2	82	R	114	r
51	3	83	S	115	s
52	4	84	T	116	t
53	5	85	U	117	u
54	6	86	V	118	v
55	7	87	W	119	w
56	8	88	X	120	x
57	9	89	Y	121	y
58	:	90	Z	122	z
59	;	91	[	123	{
60	<	92	\	124	|
61	=	93	]	125	}
62	>	94	^	126	~
63	?	95	_		

Fig. 55. Código ASCII [39].

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizaron pruebas de campo comparando el equipo Hawk que dispone de una red de 3 nodos, con el equipo de Libelium que cuenta con una red de dos nodos (Smart Agriculture y Smart Agriculture Pro), de estos se usó el sensor de temperatura y la estación meteorológica WS3000, adicionalmente se empleó un anemómetro digital para corroborar la velocidad del viento.

Kit de Libelium (Smart Agriculture 3.0)

Libelium es una organización española especializado en internet de las cosas, cuenta con productos como Wasmote y Meshlium, que permiten monitorizar de manera inalámbrica cualquier parámetro ambiental [30].

Existe una gran cantidad de modelos de Wasmote Plug & Sense!, con diferentes funcionalidades, se trabajó con dos modelos llamados “Smart Agriculture & Smart Agriculture PRO”, así como se observa en la Figura 56.



Fig. 56. Kit de Libelium [30].

Este dispositivo cuenta con sockets para la conexión de los diferentes sensores, como se puede observar en la Tabla VIII. La sonda de temperatura (DS18B20) pertenece al nodo “Smart Agriculture” y la sonda de temperatura (Pt-1000) al nodo “Smart Agriculture Pro”.

TABLA VIII. CONEXIONES PARA EL EQUIPO LIBELIUM.

Sensor	Sockets					
	A	B	C	D	E	F
Soil Temperature (Pt-1000)				√		
Soil Temperature (DS18B20)				√		
WS-3000(anemometer + wind vane + pluviometer)	√					

En la Tabla IX se indican los parámetros de medición del proyecto y se visualizan los sensores en común con el equipo de Libelium.

TABLA IX. COMPARACIÓN DE SENSORES.

Parámetro	Sensor Libelium	Sensor Utilizado
Temperatura	DS18B20 & Pt-1000	DS18B20
Monóxido de carbono	NO	MQ-7
Dióxido de carbono	NO	MQ-135
Velocidad del viento	WS3000	WS3000
Dirección del viento	WS3000	WS3000
Geolocalización	NO	GPS L80

A. Prueba Nodos Hawk con punto común.

La prueba se desarrolló en la parroquia El Valle, en donde se colocó los tres nodos en un mismo punto y se simuló un incendio forestal (llama), como se aprecia en la Figura 57.



Fig. 57. Simulación de Incendio Forestal.

La ubicación de los nodos y el Gateway mostrada en la Figura 58 se obtuvo de la plataforma ThingSpeak, puesto que cada nodo cuenta con un sistema GPS.

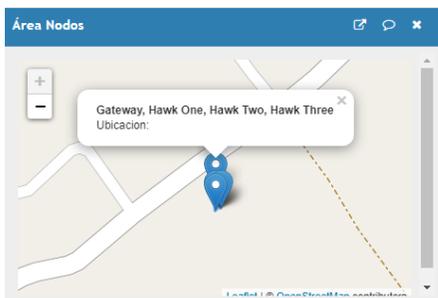


Fig. 58. Ubicación de los nodos y el Gateway en ThingSpeak

Primero se analizó el sensor de monóxido de carbono MQ7, observando similitud entre las curvas de los tres nodos. Los sensores de CO perciben partículas en diferentes proporciones debido a la variabilidad del humo, como se visualiza en la Figura 59.

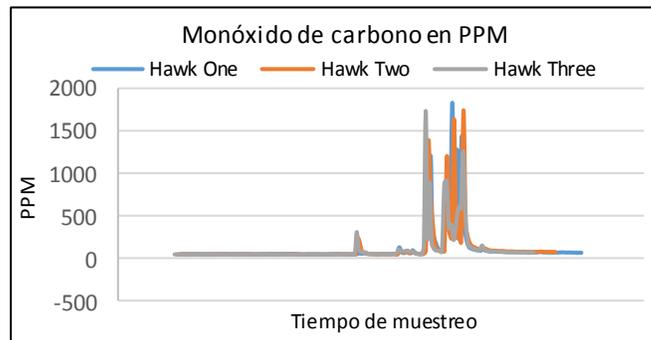


Fig. 59. Curva de Monóxido de Carbono.

En la Figura 60 se observa que el comportamiento de las curvas de los sensores MQ-135 de dióxido de carbono (CO₂), es similar a la curva de CO. Lo que indica que la lectura de los sensores es correcta.

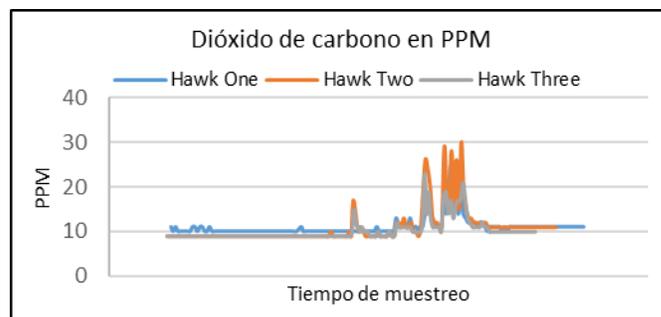


Fig. 60. Curva de Dióxido de Carbono.

En la Figura 61 se observa el registro del sensor de temperatura, en la cual los nodos dos y tres registran un mayor grado de temperatura en relación al nodo uno, puesto que se encontraban más cerca de la llama, sin embargo, las curvas de temperatura son idénticas, lo que indica que los sensores DS18B20 operan correctamente.

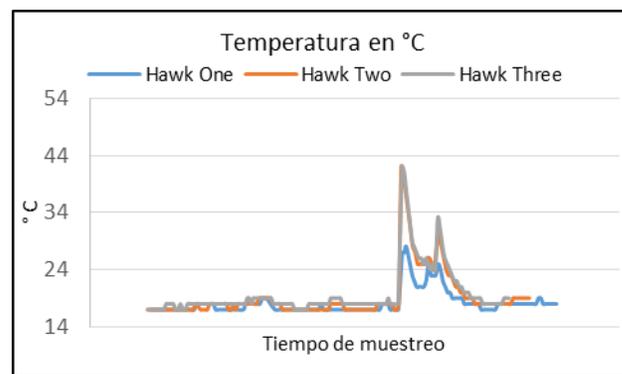


Fig. 61. Curva de Temperatura.

B. Prueba Nodos Hawk con Llama Individual.

En esta prueba, la llama presentó mayor intensidad en el primer nodo. Cada nodo se colocó en diferente posición, como se aprecia en la Figura 62.



Fig. 62. Simulación de llama individual para cada Nodo.

En la Figura 63 se contempla la ubicación de los nodos, según las coordenadas (latitud + longitud) almacenadas en ThingSpeak.



Fig. 63. Ubicación de los nodos mediante ThingSpeak.

Respecto al registro de CO, en la Figura 64 se observa que el nodo uno percibió 1206 ppm de monóxido de carbono, mientras que el nodo dos y tres alcanzaron solamente 107ppm y 177ppm respectivamente. El rango de medición de CO es amplio y puede variar de 50 a 4000 ppm.

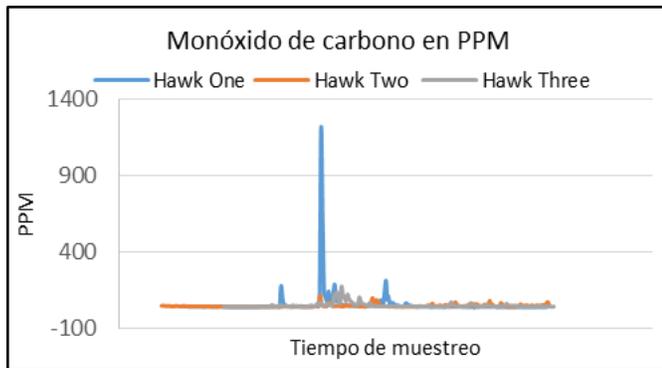


Fig. 64. Curva de Monóxido de Carbono.

La lectura de los sensores MQ135 es similar, en donde el primer nodo percibió más dióxido de carbono, debido a que en ese punto existió mayor intensidad de humo. El valor más alto fue de 22 ppm como se indica en la Figura 65. Los valores del Dióxido de carbono se presentan de forma baja ya que el rango de mediciones está entre 10 a 200 ppm.

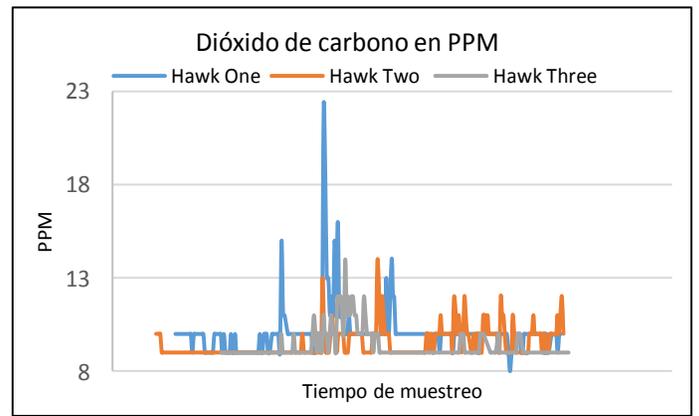


Fig. 65. Curva de Dióxido de Carbono.

Al analizar la temperatura, en la Figura 66, el nodo Hawk One registra temperaturas mayores debido a su proximidad con la llama en relación a los otros nodos.

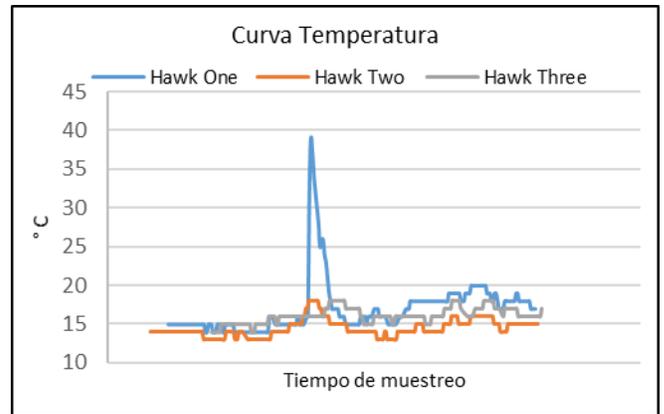


Fig. 66. Curva de Temperatura.

C. Prueba Nodos Hawk con Llama Central.

La ubicación de los nodos fue la misma que la prueba anterior, en esta ocasión se aplicó una llama central para valorar el funcionamiento de los sensores de CO, CO₂ y temperatura, como se considera en la Figura 67.



Fig. 67. Llama Central.

En la Figura 68 se observa que el nodo dos fue el que captó una mayor cantidad de CO, siendo el primer nodo el que captó menor cantidad de CO debido a que se encontraba en la dirección opuesta a la que se dirigía el viento.

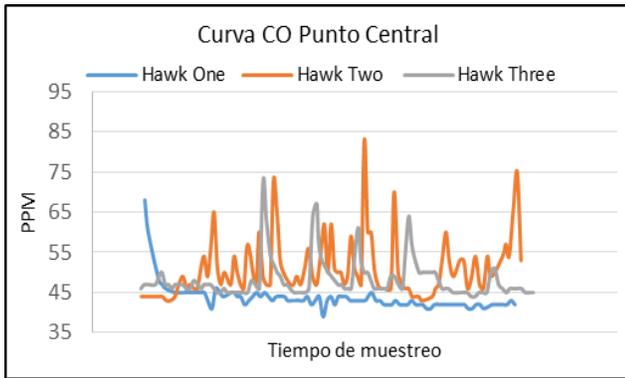


Fig. 68. Curva de Monóxido de Carbono.

En relación al CO₂ como se contempla en la Figura 69, el segundo nodo es el que presentó mayores variaciones. Los resultados de las curvas no son lineales pues, la variación del viento afecta en cierta manera la obtención de datos de CO y CO₂.

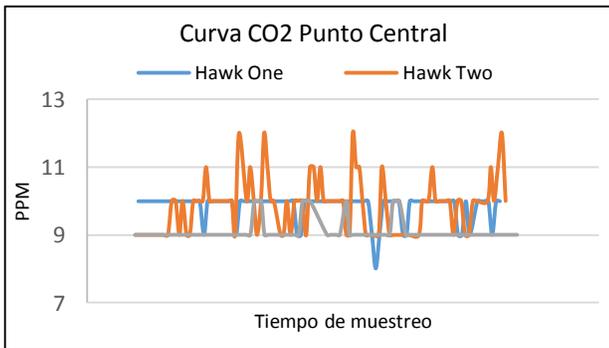


Fig. 69. Curva de Dióxido de Carbono.

Los nodos se colocaron en diferentes lugares; lo que explica la variación respecto a las curvas de temperatura de la Figura 70.

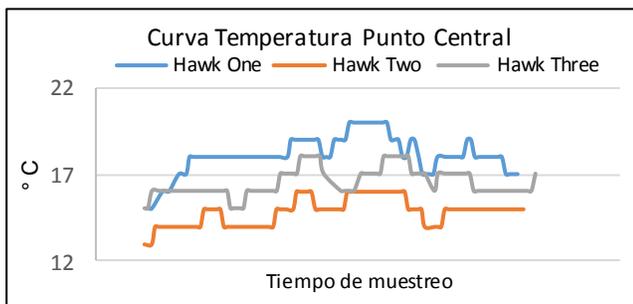


Fig. 70. Curva de Temperatura.

D. Prueba Comparativa entre Nodos Hawk y Libelium en diferentes puntos "Llama Individual".

Esta prueba se realizó en Zhullin, Cañar. El objetivo fue contrastar las mediciones de los sensores de temperatura DS18B20 del equipo Hawk, con los sensores DS18B20 y PT1000 de los equipos de Libelium (Smart Agriculture y Smart Agriculture Pro).

Los nodos se situaron a diferentes distancias del Gateway, con una llama para cada nodo, como se indica en la Figura 71.

- Punto 1: Hawk One y Smart Agriculture.
- Punto 2: Hawk Two y Smart Agriculture Pro.
- Punto 3: Hawk Three y Smart Agriculture Pro.



Fig. 71. Ubicación de cada nodo con su respectiva llama.

En la Figura 72 se aprecia una fotografía con vista área proporcionada por un vehículo no tripulado (Dron), en la cual se observa el posicionamiento de los tres nodos de análisis. Además, en la Figura 73 se indica la triangulación de dichos nodos, los mismos que cubren un perímetro de 240m.



Fig. 72. Sitio de la prueba. Vista aérea.



Fig. 73. Ubicación de los nodos.

Esta prueba además de cotejar las mediciones de los sensores, permitió comprobar la comunicación inalámbrica LoRa.

Entre el nodo uno y el Gateway se interponía una vivienda, sin embargo, la comunicación se dio

satisfactoriamente. En la Figura 74 se observa las distancias de cada nodo del equipo hacia el Gateway.



Fig. 74. Distancia de los nodos hacia el Gateway.

La distancia de los nodos al Gateway (Meshlium) y Gateway LoRa (LG01-N) fue de 100m para el punto 1, 50m al punto 2 y 40m al punto 3, como se observa en la Figura 74.

La gráfica presentada en la Figura 75 indica que las curvas de temperatura entre los dos nodos se encuentran estables, con un desfase en los picos de 3°C entre ellos.

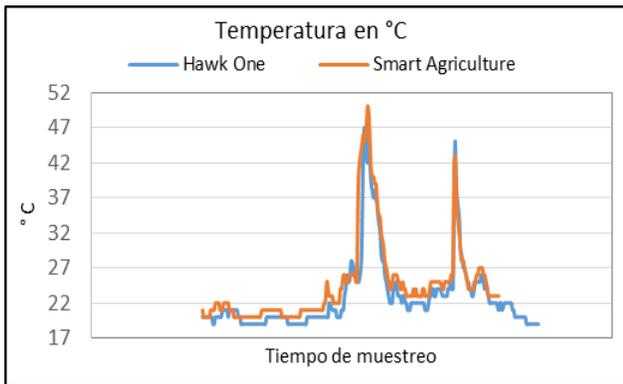


Fig. 75. Contraste de Temperatura en °C.

En la Tabla X se indica el error de temperatura existente entre los dos equipos, el cual es aceptable.

TABLA X. ERRORES DE TEMPERATURA DEL NODO HAWK ONE.

Valor %	Error en 271 datos
Error Relativo	5.7840440
Error Cuadrático Medio	3.798061970
Raíz Media Cuadrática	1.865198333

En la Figura 76 se observa las curvas de temperatura del punto 2, la cual mantiene un patrón similar.

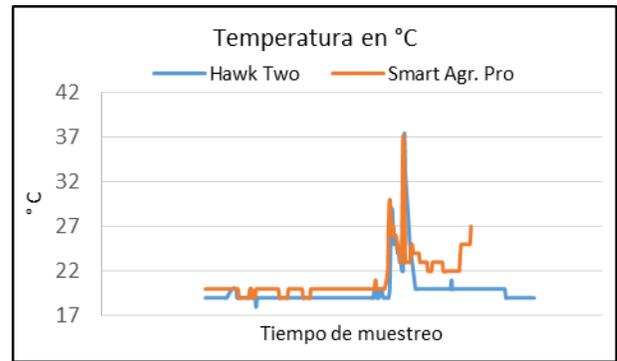


Fig. 76. Contraste de Temperatura en °C.

Los errores de temperatura entre el nodo dos del equipo y el nodo de referencia, se presentan de forma baja en valores porcentuales, lo que indica el correcto funcionamiento de los sensores. En la Tabla XI se observa los errores porcentuales.

TABLA XI. ERRORES DE TEMPERATURA DEL NODO HAWK TWO.

Valor %	Error en 151 datos
Error Relativo	4.657965
Error Cuadrático Medio	11.169442
Raíz Media Cuadrática	3.0403360

Al analizar la temperatura en el punto 3 se puede apreciar que las curvas azul y naranja forman un patrón de “V” invertida, con una amplitud máxima de 40°C. En ese momento se simuló un incendio (llama) en dicho punto, como se indica en la Figura 77.

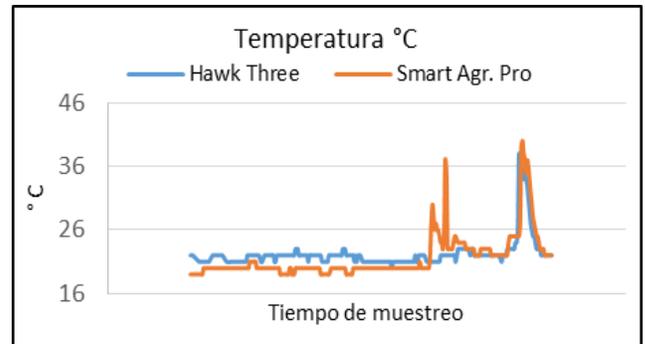


Fig. 77. Contraste de Temperatura en °C.

En la Figura 78 se observa un patrón de doble amplitud de temperatura de color naranja correspondiente al momento en que el nodo Smart Agriculture PRO se trasladó del punto 2 al 3.

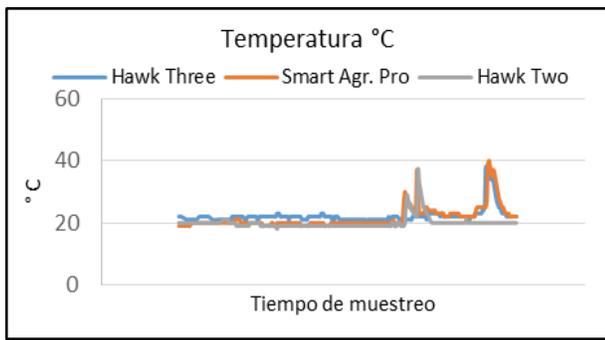


Fig. 78. Contraste de Temperatura en °C.

Para calcular el porcentaje de error en las mediciones de temperatura entre el nodo tres y el nodo de Smart Agriculture Pro, se tomaron los últimos datos de la prueba, presentando un error relativo del 7.12% y un error medio cuadrático de la raíz de 2.21% lo que indica que la calibración de los sensores de temperatura del equipo Hawk está correcta, los errores porcentuales de la prueba se presentan en la Tabla XII.

TABLA XII. ERRORES DE TEMPERATURA DEL NODO HAWK THREE.

Valor %	Error en 275 datos
Error Relativo	7.12302
Error Cuadrático Medio	5.3537209
Raíz Media Cuadrática	2.2180928

Durante esta prueba también se midió el monóxido de carbono en los tres nodos. La desigualdad entre las curvas se debe a la diferente ubicación y magnitud del incendio. En este apartado se aprecia que el segundo nodo obtuvo el parámetro más alto de CO, con una amplitud de 1740 ppm en un segmento de tiempo como se indica en la Figura 79.

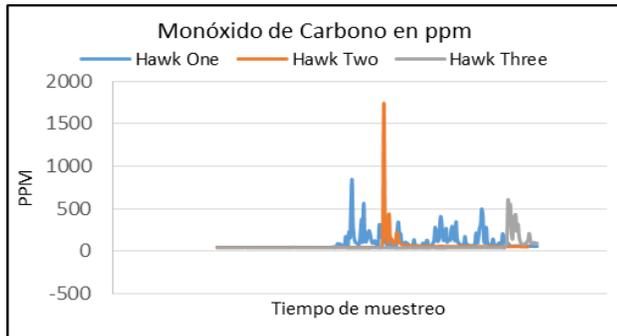


Fig. 79. Monóxido de Carbono de los nodos.

La curva del dióxido de carbono se expresa en ppm vs eje de tiempo, la lectura de los datos varía, ya que las pruebas se hicieron con diferentes llamas. En la Figura 80 se visualiza que el nodo dos, obtiene la medición más alta de CO₂ que es de 28ppm. Este gráfico indica que las amplitudes de CO y CO₂ concuerdan entre sí, lo que indica que las lecturas de los sensores y la comunicación son correctas.

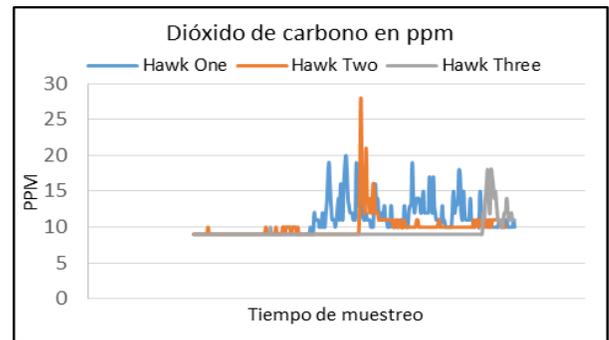


Fig. 80. Contraste de Temperatura en °C.

La estación meteorológica WS3000 mide la velocidad y dirección del viento. Las estaciones se colocaron en los nodos Hawk One y Smart Agriculture. En la Figura 81 se puede apreciar que la curva del nodo de Smart Agriculture tiene un factor de velocidad más elevado que el primer nodo del proyecto, además, se debe tener en cuenta que la latencia existente para la toma de datos es diferente para cada nodo, sin embargo, el patrón entre curvas es similar.

Este factor es importante ya que, a mayor velocidad del viento, mayor riesgo de quema durante un incendio forestal.

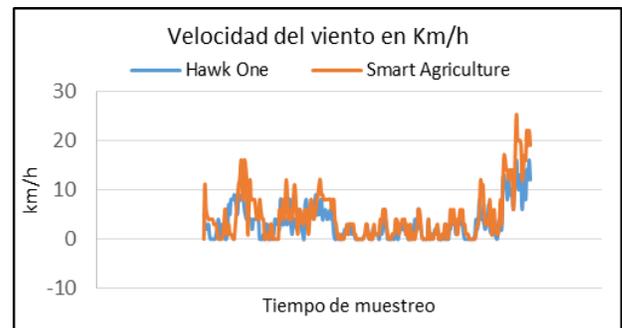


Fig. 81. Contraste de Anemómetro en Km/h.

El porcentaje de error de la velocidad del viento entre el nodo Hawk One y el nodo de Smart Agriculture, se calculó con una muestra de 271 datos, en la cual el error relativo no se puede encontrar ya que la velocidad del viento se manifiesta en ciertos casos en 0Km/h, con lo que se calculó la raíz media cuadrática con un valor de 3.68%, presentando un error aceptable del sensor, ya que el viento es cambiante. Los errores porcentuales respecto a la velocidad del viento se presentan en la Tabla XIII.

TABLA XIII. ERRORES DE VELOCIDAD DEL VIENTO DEL NODO HAWK ONE.

Valor %	Error en 271 datos
Error Relativo	Inválido
Error Cuadrático Medio	14.8237111
Raíz Media Cuadrática	3.6862402

En el nodo Smart Agriculture se notó que ciertos valores de la velocidad del viento se dirigían a cero, eso se debe a que en la programación existe un punto en donde, si no ingresa en un cierto rango de voltaje se tomaría una línea de código como Default igual a cero.

El error existente en cuanto a la dirección a la que se dirige el viento, es difícil interpretar debido a que los valores medidos se presentan en valores sexagesimales, y el tiempo de llegada de cada dato es diferente, por ello para verificar el correcto funcionamiento de este sensor se realizó una calibración de forma manual, mencionado anteriormente en la sección (*Calibración de Veleta*), en la cual se observa que los datos de orientación son los mismos. El patrón referente a la dirección del viento se indica en la Figura 82.

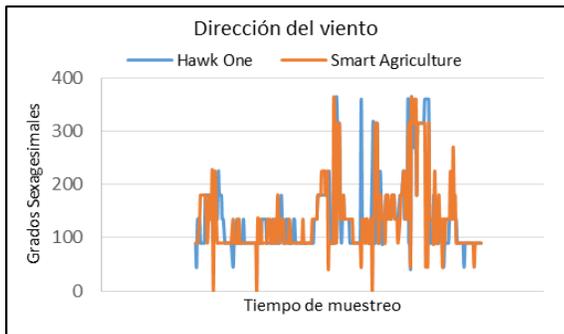


Fig. 82. Contraste de la dirección del Viento.

E. Prueba comparativa de Temperatura entre Nodos Hawk y Libelium en un mismo punto.

En esta prueba se colocaron los tres nodos del equipo junto a los dos nodos de Libelium como se observa en la Figura 83. El objetivo de esta prueba fue ubicar todos los nodos en un mismo sector para así poder cotejar los sensores de temperatura.



Fig. 83. Ubicación de los equipos.

A continuación, en la Figura 84, se muestra la ubicación exacta mediante ThingSpeak a la cual fueron colocados los nodos.

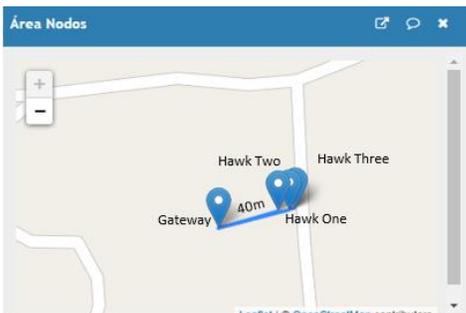


Fig. 84. Ubicación mediante GPS.

En las curvas presentadas en la Figura 85 se puede visualizar que el nodo Hawk One percibió mayor grado de temperatura. Los nodos de Libelium se tomaron como patrón para cotejar las mediciones de temperatura, obteniendo un resultado satisfactorio.

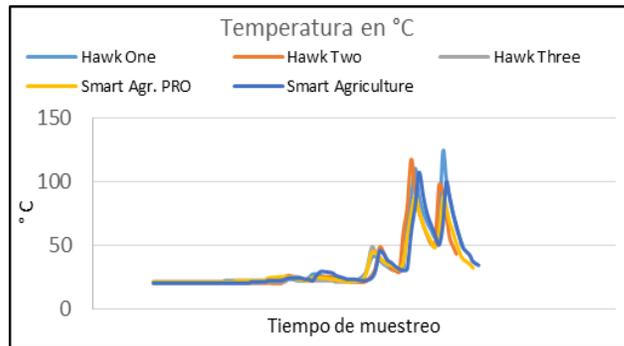


Fig. 85. Contraste de sensores de Temperatura.

Para calcular el error relativo y el error medio cuadrático entre los sensores de los tres nodos del proyecto y los dos nodos de Libelium, se calculó la media aritmética entre ellos. Los porcentajes de error se calcularon para un total de 76 datos y se revisan en la Tabla XIV.

TABLA XIV. ERRORES DE TEMPERATURA ENTRE TODOS LOS SENSORES.

Valor %	Error en 76 datos
Error Relativo	6.86428
Error Cuadrático Medio	113.9556868
Raíz Media Cuadrática	10.21661185

Una vez calculado los errores según la media aritmética de los datos de temperatura, en la Tabla XV se detallará el error correspondiente para cada nodo del equipo con respecto al nodo de Libelium01 (Smart Agriculture PRO).

TABLA XV. ERRORES DE TEMPERATURA ENTRE TODOS LOS SENSORES.

Sensores de temperatura	Error de la raíz media cuadrática
Error Hawk One vs Libelium01	1.58%
Error Hawk Two vs Libelium01	3.07%
Error Hawk Three vs Libelium01	1.33%

En la Tabla XVI se observa que el error de temperatura correspondiente para cada nodo implementado con respecto al nodo de Libelium02 (Smart Agriculture) es mínimo.

TABLA XVI. ERRORES DE TEMPERATURA ENTRE TODOS LOS SENSORES.

Sensores de temperatura	Error de la raíz media cuadrática
Error Hawk One vs Libelium02	3.21%
Error Hawk Two vs Libelium02	3.21%
Error Hawk Three vs Libelium02	0.03%

F. Prueba comparativa Nodos Hawk y Libelium en Punto Común.

El objetivo de esta prueba es contrastar los sensores de temperatura del proyecto con Libelium, además de comparar las mediciones de los sensores de CO y CO₂ de los tres nodos Hawk. Todos los nodos se ubicaron en el mismo plano XY como se indica en la Figura 86 y Figura 87.



Fig. 86. Lugar de la prueba.

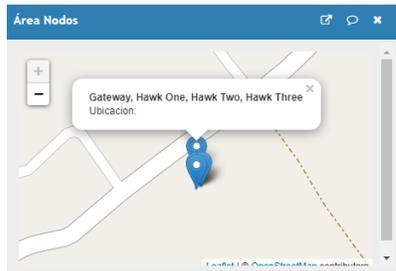


Fig. 87. Ubicación de los nodos mediante GPS.

En la Figura 88, las curvas de los nodos Hawk tienen un desplazamiento en el tiempo con respecto a los nodos de Libelium; esto se debe a que los nodos de Libelium subieron menor cantidad de datos con respecto a los nodos del equipo, por tal motivo no se pudo calcular el error medio cuadrático. Sin embargo, las curvas de los nodos respetan el patrón de la curva de Libelium, por lo que se puede concluir que las mediciones de los sensores de temperatura DS18B20 están correctas.

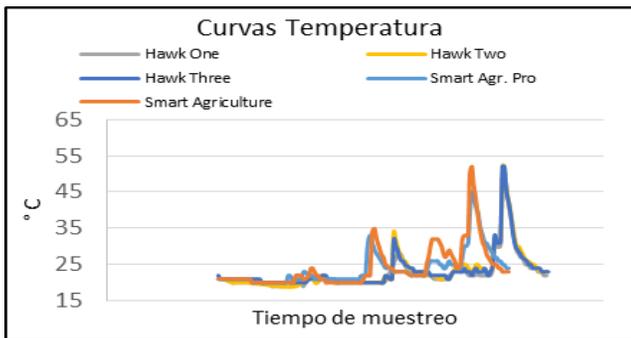


Fig. 88. Contraste de las curvas de Temperatura.

A continuación, se presenta las curvas obtenidas de monóxido de carbono de los tres nodos Hawk, donde se puede visualizar que el nodo dos presenta un valor de 1247 ppm, siendo el nodo uno, el que menor partículas de CO

percibió. En la Figura 89 se observa que las curvas siguen la misma analogía.

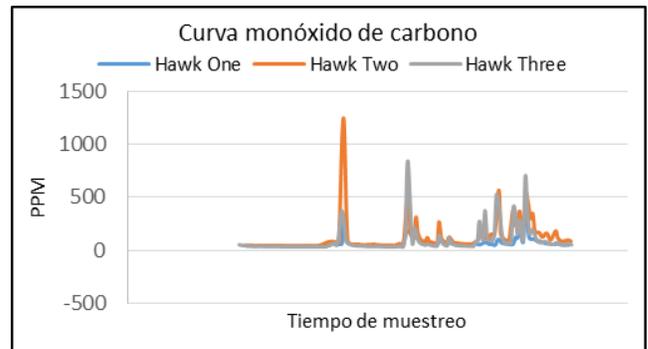


Fig. 89. Curva de Monóxido de Carbono.

En las curvas del dióxido de carbono se observa que el segundo nodo es el que obtuvo un mayor valor de partículas de CO₂, este valor alcanzó 29ppm.

Según la Figura 90, las curvas de CO₂ de los tres nodos Hawk, mantienen la misma analogía, lo que indica que las mediciones de los sensores son apropiadas.

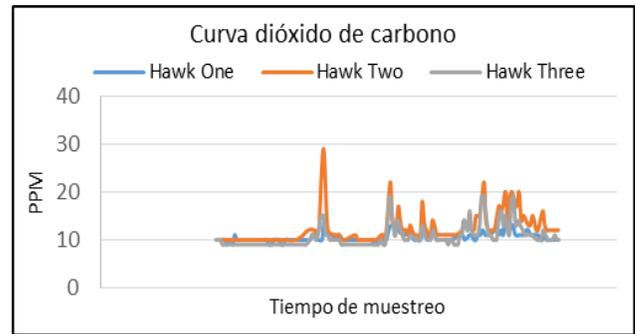


Fig. 90. Curva de Dióxido de Carbono.

G. Prueba comparativa de Velocidad y Dirección del Viento.

En la Figura 91 se muestra la ubicación obtenida en la plataforma de ThingSpeak del lugar donde se realizó a prueba.



Fig. 91. Sitio de la prueba.

Para contrastar la velocidad del viento se utilizaron las 2 estaciones meteorológicas (WS3000) del equipo de Libelium y del equipo Hawk, además se ocupó un anemómetro digital.

Se programó que cada equipo almacene datos cada 20 segundos. El anemómetro digital almacenó mayor número de datos, debido que al guardar los datos en tiempo real y no enviarlos hacia un servidor, el proceso es más rápido, comparado con los otros equipos que presentaron curvas similares. La velocidad registrada por cada equipo es en Km/h y se presenta en la Figura 92.

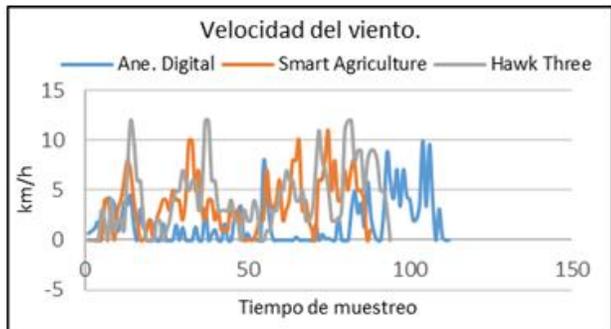


Fig. 92. Contraste de la velocidad del viento entre Equipos.

Respecto al porcentaje de error obtenido durante la prueba de velocidad del viento con los 3 equipos, no es posible obtener el error relativo porque se tiene divisiones para cero al momento de tomar los datos para la ecuación, sin embargo, se expone los siguientes errores en la Tabla XVII.

TABLA XVII. ERROR HAWK THREE Y ANEMÓMETRO DIGITAL.

Valor %	Error en 94 datos
Error Cuadrático Medio	20.517291785
Raíz Media Cuadrática	3.9804819

En la Tabla XVIII se observan los errores pertenecientes a la comparación de resultados entre el equipo Smart Agriculture de Libelium y el Anemómetro Digital.

TABLA XVIII. ERROR ENTRE LIBELIUM Y ANEMÓMETRO DIGITAL.

Valor %	Error en 94 datos
Error Cuadrático Medio	16.418398732
Raíz Media Cuadrática	3.560815613

En la Tabla XIX se indican los errores pertenecientes a la comparación de resultados entre el nodo tres y el Smart Agriculture.

TABLA XIX. ERROR ENTRE LIBELIUM Y HAWK THREE.

Valor %	Error en 94 datos
Error Cuadrático Medio	14.816320011
Raíz Media Cuadrática	3.382774039

Para obtener la dirección del viento, se utilizaron las dos estaciones WS300 del equipo de Libelium y del nodo Hawk Three. Para contrastar la dirección se requiere números enteros, en este caso cada orientación se manifestó en grados sexagesimales. En la Figura 93 se observa el grado que corresponde a cada dirección. En este caso se mantuvo una dirección constante hacia el Oeste, correspondiente a 180° grados sexagesimales.

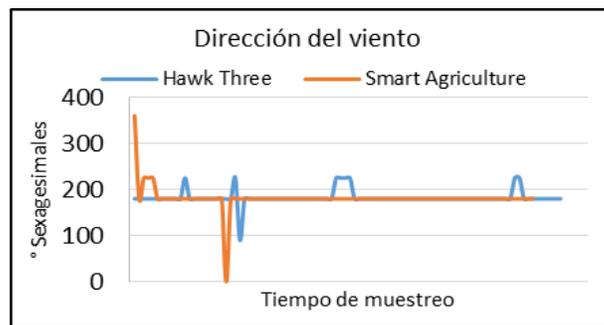


Fig. 93. Contraste Dirección Viento con Libelium.

En la Figura 93, se observa un patrón horizontal perteneciente a 180 grados sexagesimales. Las amplitudes que se desvían del patrón son errores debido a que el microcontrolador no lee espontáneamente o capturó un dato erróneo al momento que gira la veleta.

En la brújula de la plataforma de ThingSpeak de la Figura 94, se puede apreciar que la aguja apunta hacia el oeste, lo cual es correcto ya que es 180 grados. Esta API captura el último dato colocado en el campo 4 perteneciente a Dirección del viento.



Fig. 94. Brújula en ThingSpeak.

En el apartado de dirección del viento no se puede presentar un porcentaje de error debido a que son números discretos y no varían referente a una ecuación matemática. Por lo tanto, la dirección del viento se debe valorar según el dato que se presente en la nube o en el Meshlium.

H. Prueba de Alcance de la Comunicación LoRa.

El objetivo de esta prueba es establecer el rango máximo de comunicación para los nodos sensoriales. La prueba se realizó con los tres nodos del proyecto, para el primer punto se colocó el nodo uno a una distancia de 120 metros del Gateway, mientras que en la segunda prueba se situó el nodo dos a 260 metros del Gateway, y para el último punto se ubicó al tercer nodo a una distancia de 1010 metros. La prueba de alcance fue tomada con línea de vista entre el Gateway y los nodos Hawk.

A continuación, en la Figura 95, se muestra la ubicación donde se situó cada nodo.



Fig. 95. Alcance de comunicación LoRa.

El alcance máximo de comunicación que se logró fue de 1km, esto quiere decir que el área de cobertura para la red es de 3'140.000 m² como se visualiza en la Figura 96.

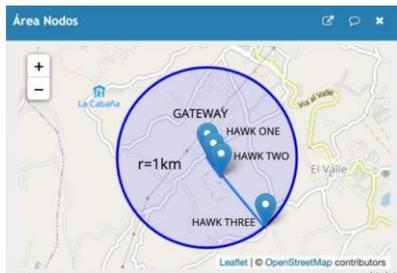


Fig. 96. Cobertura de la Comunicación LoRa.

En el apartado D, además de realizar la comparación de parámetros ambientales, también se realizó una prueba sin línea de vista, en donde se obtuvo una distancia de 100m referidos desde el nodo Hawk One hacia el Gateway LoRa, así como se observa en la Figura 74. Esta distancia es aceptable puesto que el proyecto tiene como objetivo ser implementado en zonas amplias donde generalmente se dispondrá de línea de vista.

I. Cálculo de Umbrales para Determinar un Incendio Forestal.

Para establecer el umbral con el cual se indica el inicio de un incendio forestal, se calculó la media ponderada de los parámetros ambientales de CO, CO₂ y temperatura, utilizando los datos obtenidos en las pruebas de campo A y F. Para el cálculo de la media ponderada, se agregó pesos de 1 a 5 a todas las mediciones, en donde 1 corresponde a un valor bajo y 5 a un valor máximo.

De los datos de la prueba A, se calculó la media ponderada, los cuales se muestran en la tabla XX.

TABLA XX. UMBRALES DE LA PRUEBA A.

Nodos	CO (PPM)	CO ₂ (PPM)	Temperatura (°C)
Hawk One	196.352	11.901	18.850
Hawk Two	230.497	12.847	20.973
Hawk Three	205.825	11.425	21.319

De los datos de la prueba F, se calculó la media ponderada, los cuales se muestran en la tabla XXI.

TABLA XXI. UMBRALES DE LA PRUEBA F.

Nodos	CO (PPM)	CO ₂ (PPM)	Temperatura (°C)
Hawk One	98.076	11	24.217
Hawk Two	201.780	14.164	26.018
Hawk Three	201.021	13	27.595

Con los datos de las tablas XX y XXI se calculó la media aritmética, para determinar el umbral del inicio de un incendio forestal. Los valores obtenidos de la media se detallan en la tabla XXII.

TABLA XXII. UMBRALES PARA UN INCENDIO FORESTAL.

CO (PPM)	CO ₂ (PPM)	Temperatura (°C)
188.925	12.38	23.162

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación del sistema de monitoreo y posicionamiento geográfico para la prevención de incendios forestales, permitió obtener buenos resultados en cuanto a la lectura de parámetros ambientales, la comunicación inalámbrica entre el Nodo y el Gateway y la comunicación con el servidor (ThingSpeak).

Se logró la implementación del Hardware de los tres nodos Hawk de manera satisfactoria, ya que constó en integrar la tarjeta microcontroladora, la tarjeta de comunicación LoRa, la tarjeta de conexiones PCB, el circuito de alimentación y los sensores para la medición de variables ambientales.

El diseño logrado en cuanto a la estructura física de los nodos Hawk, permitió que el Hardware quede de manera adecuada dentro del mismo, además de ser una estructura robusta, lo cual facilita la instalación en árboles para la realización de las pruebas de campo.

La comunicación de los nodos del sistema hacia el Gateway se realizó por TDM (multiplexación por división de tiempo), en la cual cada nodo tuvo un desplazamiento de conexión de 400ms entre ellos, brindando un enlace de comunicación satisfactorio.

La trama de datos de comunicación LoRa elaborada en código de programación, tuvo una magnitud de 32 bytes o 256 bits, con lo que se concluye que el rendimiento de la comunicación inalámbrica referente al hardware y al software del equipo Hawk fue óptimo.

Los datos almacenados en el servidor de ThingSpeak, permitió visualizar en tiempo real la información de los sensores de monóxido de carbono, dióxido de carbono, dirección del viento, velocidad del viento, y las coordenadas GPS. Además, la plataforma ThingSpeak posibilitó exportar los datos en formato xlsx (Excel), para analizar y calcular los errores.

En la Tabla XXIII se observa el error relativo perteneciente a las coordenadas GPS de los tres nodos con respecto a la aplicación de Google Maps.

TABLA XXIII. ERROR RELATIVO DE GPS.

Nodos Hawk	Error relativo
One	0.00154 %
Two	0.00246 %
Three	0.00404 %

En base a las pruebas de campo realizadas, se observó que el tiempo para la obtención de coordenadas GPS varía de acuerdo al lugar en donde esté ubicado el nodo. Al encontrarse la antena con línea de vista, el tiempo en encontrar las coordenadas GPS será menor a 1 minuto, mientras que al encontrarse sin línea de vista tardará de 1 a 5 minutos.

En la Tabla XXIV se observa el alcance máximo de comunicación LoRa entre el nodo Hawk y el Gateway.

TABLA XXIV. ALCANCE DE COMUNICACIÓN LoRa

Comunicaciones LoRa 915Mhz	
Con línea de Vista	1010m
Sin línea de Vista	100m

En la Tabla XXV se observa los errores medios cuadráticos referente al sensor de temperatura y velocidad de viento de la prueba de campo, literal D.

TABLA XXV. ERROR EN LA TEMPERATURA Y VELOCIDAD VIENTO

Sensores	Hawk One vs Libelium	Hawk Two vs Libelium	Hawk Three vs Libelium
Temperatura	1.865%	3.04%	2.21%
Velocidad del viento	3.68%	----	----

En la Tabla XXVI se observa el error medio cuadrático referente al sensor de temperatura de la prueba E. El equipo de Libelium01 pertenece al nodo Smart Agriculture Pro y Libelium02 al nodo Smart Agriculture.

TABLA XXVI. ERRORES DE TEMPERATURA.

Sensores de temperatura	Error de la raíz media cuadrática
Error Hawk One vs Libelium01	1.58%
Error Hawk Two vs Libelium01	3.07%
Error Hawk Three vs Libelium01	1.33%
Error Hawk One vs Libelium02	3.21%
Error Hawk Two vs Libelium02	3.21%
Error Hawk Three vs Libelium02	0.03%

En la Tabla XXVII se observa los errores medios cuadráticos referente al sensor de velocidad de viento de la prueba G en donde HP856A es el anemómetro digital.

TABLA XXVII. ERROR EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Sensores	Hawk Three vs HP856A	Libelium vs HP856A	Libelium vs Hawk Three
Velocidad del Viento	3.98%	3.56%	3.38%

En las pruebas de campo se comprobó que el sistema Hawk cumple con el objetivo planteado, pues las mediciones entre los nodos implementados y los nodos de Libelium son similares, logrando un error mínimo entre las mediciones, además de haber creado un equipo de bajo coste con respecto a Libelium. También podemos concluir que, a mayor número de datos en las pruebas, menor será el error medio cuadrático.

Con los datos obtenidos en las tablas XX y XXI se concluye que para determinar el inicio de un incendio forestal se tendrá que superar 3 umbrales, es decir 188.925 ppm para CO, 12.32 ppm para CO₂ y 23.162°C para la temperatura, como se muestra en la tabla XXII, de esa manera se alertará a través de la plataforma de ThingSpeak al guardabosque y/o cuerpo de bomberos.

Los nodos Hawk presentan un consumo de energía de 3.36Wh, permitiendo un tiempo de operación de 6 horas con el uso de las baterías. Por ello se recomienda incorporar paneles solares y un regulador de carga para lograr un sistema autónomo, de esa manera recolectar un amplio rango de datos para futuros estudios relacionados con la predicción de incendios forestales.

Se recomienda que, al momento de instalar la estación meteorológica, la aguja de la veleta apunte hacia el Norte para que los datos del sensor sean los correctos.

Para un correcto coste de comunicación inalámbrica LoRa se recomienda analizar qué tipo de dato se enviará hacia el Gateway, y de acuerdo a eso la codificación es de vital importancia para obtener un mayor alcance de comunicación, disminuir el consumo de batería y latencia.

VI. REFERENCIAS.

- [1] A. Emergencias, «Incendios "Teoría del Fuego",» [En línea]. Available: <https://www.aprendemergencias.es/incendios/teoria-del-fuego/>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [2] V. C. G. M. K. G. Maurizio Burlando, «Incendios Forestales. Evaluación del riesgo y casos de estudio en Bulgaria, Grecia, Italia y España,» Evande, [En línea]. Available: http://www.evande.eu/wp-content/uploads/2016/12/EVANDE_ForestFires_FinalES.pdf. [Último acceso: 22 Enero 2020].
- [3] G. F. C. J. R. Jován Pulgarín, «Australia: Todo lo que debes saber sobre los incendios forestales,» cnet, 13 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.cnet.com/es/noticias/australia-incendios-causas-consecuencias-koalas/>. [Último acceso: 14 Enero 2020].
- [4] N. Geographic, «National Geographic,» [En línea]. Available: <https://www.ngenespanol.com/el-mundo/mujer-arriesga-su-vida-salvar-koala-incendio-forestal-australia/>. [Último acceso: 14 Enero 2020].
- [5] E. Comercio, «El Comercio,» 21 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.elcomercio.com/tendencias/vista-incendios-amazonia-brasil-espacio.html>. [Último acceso: 15 Enero 2020].

- [6] M. d. Ambiente, «Parque Nacional Cajas,» [En línea]. Available: <http://www.ambiente.gob.ec>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [7] E. Tiempo, «“Los efectos de incendios forestales son permanentes”», Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com.ec>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [8] J. Solobera, «Detecting Forest Fires using Wireless Sensor Networks,» Libelium, 4 September 2010. [En línea]. Available: <http://www.libelium.com>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [9] J. M.-d. D. L. A.Ollero, Sistema Basado en el Empleo de Vehículos Aéreos no Tripulados para la Lucha contra Incendios Forestales, Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2007.
- [10] I. Earthzine, «Mitigation of Forest Fires at the Municipal Level: The Case of Mirandela, Portugal,» IEEE Oceanic Engineering Society, 5 Noviembre 2013. [En línea]. Available: <https://earthzine.org/mitigation-of-forest-fires-at-the-municipal-level-the-case-of-mirandela-portugal/>. [Último acceso: 16 Enero 2020].
- [11] E. Z. M. Á. T. Q. M. V. G. C. S. L. Byron Oviedo, «Redes Inalámbricas de Sensores para Detección Temprana de Incendios Forestales,» Ciencia y Tecnología, vol. 1, n° 18, p. 12, 2018.
- [12] J. M. -. d. Dios, A. Ollero, L. Merino y B. Arrue, «Revista independiente de los profesionales de la extinción de incendios forestales,» Forex, vol. 15, n° 15, p. 6, 2006.
- [13] C. A. M. Torres, Sistema de monitoreo en la nube para medir los riesgos ambientales basados en sensores de bajo costo., Bogotá: Universidad Piloto de Colombia, 2016.
- [14] J. K. Erazo P y C. A. Hervas P, «Sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (Zigbee),» Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2014.
- [15] J. R. M. Calderón, Diseño de un sistema de monitoreo de incendios forestales en tiempo real, basado en internet de las cosas y plataformas como servicio en la nube, Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2016.
- [16] K. Jayaram, K. Janani, R. Jeyaguru, R. Kumaresh y N. Muralidharan, «Forest Fire Alerting System With GPS Co-ordinates Using IoT,» de 2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, India, 2019.
- [17] A. S. Chand, K. S. Bhargavi, R. S. Kiran, M. Kaushik, D. R. Prashanthi y S. S. Kumar, «Developing a real-time and automatic early warning system for forest fire,» de 2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET), Kottayam, India, India, 2018.
- [18] T. S. J. Álvaro, Sistema de monitoreo vehicular usando dispositivos GPS., Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2009.
- [19] C. M. Pascual, «Bluetooth: criterios de selección y comparativa con otras tecnologías inalámbricas,» Técnica Industrial, n° 298, pp. 76-80, 2012.
- [20] D. E. CUJI COQUE y D. X. PAZMIÑO MORENO, «Diseño e implementación de una red WSN (Wireless Sensor Network), basado en los protocolos Zigbee, Wifi, para el monitoreo de variables climáticas en el invernadero ubicado en la provincia de Cotopaxi,» Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, 2015.
- [21] A. J. Gómez, «Diseño Conceptual de un Shield Multi protocolo Wireless,» Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, 2018.
- [22] D. Gutiérrez Reina, «e-Reding (Diseño de redes móviles Ad-Hoc),» Universidad de Sevilla, [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70218>. [Último acceso: 10 12 2019].
- [23] M. Á. C. González, «Red IoT LoRaWAN,» ALFAIoT, [En línea]. Available: <https://alfaiot.com/blog/ultimas-noticias-2/post/inaugurada-la-red-iot-lorawan-en-salamanca-1#wrap>. [Último acceso: 10 12 2019].
- [24] MOKOSmart, «IoT Designer & Manufacturer,» Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.mokosmart.com/es/how-does-lora-sensor-send-and-receive-data/>. [Último acceso: Marzo 2020].
- [25] I. Pirata, «Definición de IoT,» 19 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://iotpirata.com>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [26] I. The MathWorks, «ThingSpeak,» [En línea]. Available: <https://thingspeak.com/>. [Último acceso: Marzo 2020].
- [27] Tecmikro, «Arduino Uno R3,» TECmikro, [En línea]. Available: <https://tecmikro.com/arduino/618-arduino-uno-r3.html>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [28] L. Dragino Technology Co., «Arduino Shield featuring GPS and LoRa® technology,» Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.dragino.com/products/lora/item/108-lora-gps-shield.html>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [29] Dragino, «LG01-N LoRa Gateway,» 31 Octubre 2019. [En línea]. Available: <http://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/143-lg01n.html>. [Último acceso: 3 Diciembre 2019].
- [30] Libelium, «Waspmote Plug & Sense! Sensor Guide,» 09 2019. [En línea]. Available: <https://development.libelium.com/agriculture-sensor-guide/sensors>. [Último acceso: 11 2019].
- [31] «Mongabay,» 18 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://es.mongabay.com/2018/03/australia-halcones-desatan-incendios/>. [Último acceso: 15 10 2020].
- [32] N. M. SAC, «Sensor de monóxido de carbono MQ-7,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-gas/74-sensor-de-monoxido-de-carbono-mq7.html>. [Último acceso: febrero 2020].
- [33] N. M. SAC, «Sensor Calidad Aire MQ135,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-gas/73-sensor-calidad-aire-mq135.html>. [Último acceso: febrero 2020].
- [34] Hanwei, «Technical data MQ-7 Gas Sensor,» ELECTRONICS CO. LTD, [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf>. [Último acceso: Marzo 2020].
- [35] Wikidot, «Sistema de Control de CO2 en Ambientes Cerrados,» Junio 2 2017. [En línea]. Available: <http://newtech-usta.wikidot.com/proyecto-1-proyecto-jvj>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [36] «Electro Schematics,» 21 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.electroschematics.com/anemometer/>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [37] J. Miguel, «Genbeta,» 29 Abril 2011. [En línea]. Available: <https://www.genbeta.com/desarrollo/como-calcular-la-distancia-entre-dos-puntos-geograficos-en-c-formula-de-haversine>. [Último acceso: 24 Septiembre 2020].
- [38] CCNA, «Curso en línea CCNA,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/cursoenlineaccna1/unidad-4-capa-de-enlace-de-datos/4-1-capa-de-enlaces-de-datos-acceso-a-los-medios/4-1-3-capa-de-enlace-de-datos-creacion-de-una-trama>. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [39] R. Ramone, «Introducción a la ingeniería en sistemas,» 17 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://rafaramoneblog.wordpress.com/2017/02/17/tabla-ascii/>. [Último acceso: Septiembre 2020].