



Revista de Investigación en Tecnologías de la Información
ISSN: 2387-0893
revista.riti@gmail.com
Universitat Politècnica de Catalunya
España

Tatayo Vinueza, Edison; Llugsi Cañar, Ricardo
Implementación de una mini-red de sensores inalámbricos
para detección temprana de incendios forestales
Revista de Investigación en Tecnologías de la
Información, vol. 10, núm. 21, Esp., 2022, pp. 88-99
Universitat Politècnica de Catalunya
España

DOI: <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.008>

- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org





Implementación de una mini-red de sensores inalámbricos para detección temprana de incendios forestales

Implementation of a mini-network of wireless sensors for early detection of forest fires

Edison Tatayo Vinueza

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
edison.tatayo@epn.edu.ec

Ricardo Llugsi Cañar

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
ricardo.llugsi@epn.edu.ec

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.008>

Recibido: Junio 06, 2022

Aceptado: Agosto 14, 2022

Resumen: Este artículo presenta la implementación de un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de un incendio forestal, evitando la pérdida de extensas áreas boscosas, flora, fauna y afecciones a la salud de habitantes aledaños a las zonas perjudicadas. La mini-red dispone en su núcleo tarjetas Raspberry Pi en las versiones Zero y 2B+ para el procesamiento de datos del entorno y módulos de comunicación inalámbrica XBee S3B para interconexión entre los nodos transmisores y coordinador. Esta solución aprovecha la alta capacidad de procesamiento de la plataforma Raspberry Pi y el bajo consumo energético de los sensores y módulos de comunicación inalámbricos, dando como resultado un sistema autónomo, portátil, de rápido despliegue y bajo costo, adicionalmente con el propósito de constatar y discriminar visualmente la presencia de un conato de incendio se insertan módulos de cámara que permitan captar imágenes las cuales se almacenan en un servidor web alojado en la nube. Para analizar el desempeño y ubicación adecuada de los nodos que conforman la mini-red se realizan mediciones in situ para evaluar la zona máxima de cobertura y la pérdida de paquetes durante la transmisión inalámbrica ZigBee, dando como resultado un sistema de alerta confiable, autónomo y de bajo costo.

Palabras clave: *Raspberry Pi, XBee, Incendio Forestal, Python, Sensores.*

Abstract: This article presents the implementation of an early warning system in the event of a forest fire, avoiding the loss of extensive wooded areas, flora, fauna, and health conditions of inhabitants surrounding the affected areas. The mini network has at its core Raspberry Pi cards in the Zero and 2B+ versions for processing environment data and XBee S3B wireless communication modules for interconnection between the transmitter and coordinator nodes. This solution takes advantage of the high processing capacity of the Raspberry Pi platform and the low energy consumption of the sensors and wireless communication modules, resulting in an autonomous, portable, rapid deployment and low-cost system, additionally with the purpose of verifying and to visually discriminate the presence of an outbreak of fire, camera modules are inserted that allow images to be captured, which are stored on a web server hosted in the cloud. To analyze the performance and proper location of the nodes that make up the

mini-network, in situ measurements are made to assess the maximum coverage area and packet loss during ZigBee wireless transmission, resulting in a reliable, autonomous alert system. and low cost.

Keywords: *Raspberry Pi, Xbee, Fire Forest, Python, Sensors.*

1. Introducción

Los incendios forestales son una problemática real que en los meses de verano arrasa con extensas áreas boscosas, su origen puede de ser de forma natural o por agentes externos, generando grandes pérdidas de vegetación y fauna, contribuyendo a cambios en el microclima de la zona afectada al igual que la erosión del suelo, y daños en la salud de habitantes aledaños a las zonas perjudicadas debido a la presencia de material particulado que conlleva a la disminución de la calidad del aire. A pesar de los esfuerzos realizados por los organismos de control y combate ante incendios forestales, la problemática aún no se logra mitigar, debido a falta de concientización en la ciudadanía, colaboración e integración de la comunidad.

Actualmente el avance tecnológico y el desarrollo de nuevos estándares de comunicación permiten enfrentar problemas ambientales como los incendios forestales, mediante el despliegue de Redes de Sensores Inalámbricas WSN bajo el estándar IEEE 802.15.4, las cuales cubren áreas donde el acceso cableado es limitado. En general las WSN proporcionan un nuevo mecanismos de monitoreo, detección y alerta temprana de bajo consumo energético y mantenimiento, debido a que al estar compuesta de varios nodos es capaz de obtener características del entorno que lo rodea, adquiriendo variables tales como humedad, presión, niveles de concentración, velocidad y dirección del viento, entre otros, contribuyendo a la elaboración de modelos de predicción de comportamiento y promoviendo la creación de una amplia gama de aplicaciones de diferentes índoles.

Por lo tanto, la presente implementación pretende brindar una solución de monitoreo, detección y alerta temprana de tipo open source disponible para los organismos de control y la ciudadanía en general, considerando a los incendios forestales como una problemática de alto impacto asociada al cambio climático experimentado a nivel mundial en los últimos años. La mini-red de detección no solo permitirá el monitoreo de variables meteorológicas de un entorno específico, pretende también alertar tempranamente el conato de un incendio forestal e indicar su posición geográfica, permitiendo a los organismos de mitigación agilizar las tareas de logística y evitar la propagación y pérdida de extensas zonas boscosas. Además, gestionará la información del entorno mediante tablas y galerías dinámicas alojadas en un servidor en la nube, el cual periódicamente se actualizará de acuerdo con las muestras adquiridas por los nodos que conforman la red.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 proporciona una descripción de los efectos de un incendio forestal y una breve introducción de las tecnologías involucradas, en la sección 3 se describen los componentes, configuraciones y segmentos de código de los elementos *open source* que conforman la mini-red. En la sección 4 se presentan los resultados de las pruebas obtenidas con el propósito de evaluar el alcance, tiempo de monitoreo ideal y consumo de energía de los nodos que conforman la mini-red. Finalmente se presentan las conclusiones más relevantes y las posibles modificaciones a futuro.

2. Estado del arte

2.1. Incendios Forestales

Se define como incendio forestal al fuego que se propaga sin control, especialmente en zonas rurales afectando la vegetación como árboles, matorrales, pastos y cultivos [1]. Para que se produzca un incendio forestal deben intervenir tres elementos: combustible, oxígeno, fuente de calor. Además de los elementos que generan el incendio forestal el comportamiento del fuego depende directamente de la topografía y factores climatológicos tales como humedad, temperatura, velocidad y dirección del viento, entre otros. Un incendio por causas naturales se puede producir en los meses de verano, donde las altas temperaturas deshidratan las plantas disminuyendo la humedad del entorno, si el factor de humedad desciende drásticamente las plantas son incapaces de obtener agua del suelo ocasionando que se sequen, consecuentemente aumentan la emisión de etileno y otros gases altamente inflamables. Si a esta exposición de gases se suman las altas temperaturas y vientos fuertes existe la posibilidad de generar una chispa que produzca un incendio. Sin embargo, hay que recalcar que el 99% de incendios forestales son producidos por causas humanas (antropogénicas) ya sea por acciones intencionadas, descuido o irresponsabilidad. Algunos

ejemplos de causas antropogénicas son: quemas agrícolas que salen de control, quema de basura, fuegos artificiales, fogatas, cigarrillos sin apagar entre otros [2].

2.1.1. Efectos de un incendio forestal

Al producirse un incendio forestal se generan cambios de hábitats, ausencias de microclimas, incremento de la vulnerabilidad de animales vertebrados e invertebrados, muerte de especies de flora y fauna, migración forzada de especies y alteración en la cadena alimenticia. No solo los seres vivos sufren los estragos de un incendio forestal sino también el suelo debido a la alteración de los ciclos biogeoquímicos del Carbono, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, entre otros. Bajo estas condiciones de alteración se incrementa la erosión por factores hídricos y eólicos [3]. Respecto a daños ocasionados en la salud humana, la exposición al humo reduce la función pulmonar, causa problemas respiratorios como bronquitis, tos, infecciones, ardor en nariz y garganta. Los niños y ancianos son la población más vulnerable.

2.2. Redes Inalámbricas de Sensores WSN

Las WSN emergen como sistemas prometedores para monitorear e interactuar con el mundo físico, presentando una diversidad de aplicaciones en las áreas de transporte, seguridad, estrategia militar, atención médica, domótica. En los últimos años las WSN se han empleado cada vez más en entornos críticos donde el acceso cableado es limitado, o donde las otras tecnologías inalámbricas como Wifi y Bluetooth demandan altos costos de implementación. Este tipo de redes tienen como principal objetivo adquirir variables del entorno utilizando sensores, para luego procesar los datos y enviar información inalámbricamente. Generalmente se caracterizan por tener un reducido consumo de energía con la finalidad de desplegar redes en ambientes donde la presencia de energía eléctrica es escasa [4]. En sus inicios el despliegue de estas redes se empleaba en áreas pequeñas alcanzando distancias en el orden de decenas de metros, pero en la actualidad se conoce que las redes inalámbricas de sensores pueden cubrir grandes distancias alcanzando el orden de decenas de kilómetros [5].

Típicamente las redes de sensores están conformadas de los siguientes cuatro elementos:

- Nodos sensores o motas: Elementos encargados de la recolección de datos o fenómenos físicos provenientes del medio con ayuda de sensores. Se componen de una unidad de procesamiento, diferentes tipos de sensores los cuales varían dependiendo de la aplicación y un módulo de transmisión inalámbrico.
- Nodos coordinadores: Reciben toda la información proveniente de los nodos sensoriales que pertenecen a una misma WSN, administran los nodos de la red y el envío de *beacons frames*.
- Gateway: Estos nodos son los encargados de conectar la red WSN con la red de datos (TCP/IP), es decir actúan como interfaz entre dos redes de diferente infraestructura permitiendo la salida de información hacia el internet [6].
- Estación base: Es donde se recibe toda la información de la red, para luego ser procesada y posteriormente almacenada. Al interactuar con un servidor web y una base de datos esta información estará al alcance del usuario.

2.3. Tecnología ZigBee

Estándar tecnológico creado por Zigbee Alliance para el desarrollo y control de las redes de sensores, su nombre se deriva de los patrones en “zig-zag” que describen las abejas al comunicarse. ZigBee es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica basado en el estándar IEEE 802.15.4 que define las capas: Física (PHY) y Control y Acceso al Medio (MAC), mientras que ZigBee Alliance proporciona las capas: Capa de Red (NWK) y Aplicación (APL).

Las principales características que se tiene en la capa PHY corresponde a la activación y desactivación del transmisor de radio, selección del canal inalámbrico, evaluación del canal, gestión de energía. La capa MAC se caracteriza por una baja complejidad la cual permite una fácil asociación a cualquier tipo de servicio que se pueda dar en la red inalámbrica y emplea CSMA-CA ranurado para el acceso al medio de cada nodo [7], [8].

Esta tecnología inalámbrica proporciona conectividad a bajas tasas de transmisión de datos entre 20 y 250 [Kbps], los dispositivos que trabajan con este tipo de tecnología tienen un mínimo consumo de energía, baja

complejidad y están pensados para el desarrollo de redes de área personal. Operan en la banda ISM de uso industrial, científico y médico, por lo tanto, trabaja en las bandas de 868 [MHz] en Europa, 915 [MHz] en Estados Unidos y 2.4 [GHz] en todo el mundo [7].

3. Materiales y métodos

La mini-red para implementar no solo integra un conjunto de sensores que permiten obtener variables meteorológicas del entorno (para poder discriminar la presencia de un incendio forestal), sino que pretende aportar capturas fotográficas del entorno, de tal manera que los organismos de socorro identifiquen la magnitud del siniestro o a su vez puedan descartar de manera efectiva falsas alarmas. El sistema funciona bajo la topología punto multipunto como se indica en la Figura 1.

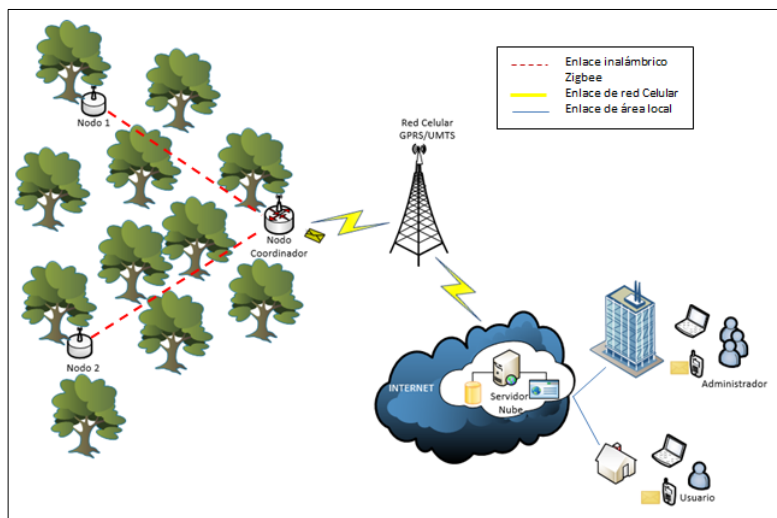


Figura 1. Topología de la mini-red de detección.

La mini-red está compuesta de tres sistemas: el primero denominado “Transmisor” compuesto de 2 nodos sensoriales, el segundo denominado “Receptor” compuesto de un nodo Coordinador-Gateway y por último el tercer componente de “Almacenamiento y Visualización” que facilita al usuario interpretar la información. Los componentes mencionados interactúan entre si permitiendo el monitoreo y la detección de incendios forestales, en la Figura 2 se presenta un diagrama del prototipo implementado.

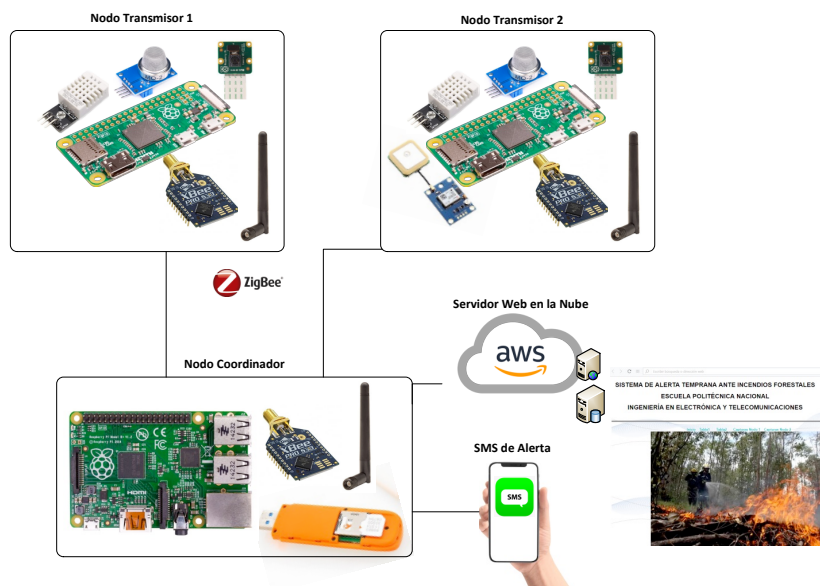


Figura 2. Diagrama estructural de la mini-red implementada.

3.1 Sistema de Trasmisión

Cada nodo transmisor está constituido por un sensor de temperatura y humedad DHT22, un sensor de humo MQ-2, un módulo GPS, una cámara, un módulo de comunicación inalámbrica XBee S3B, una tarjeta Raspberry Pi v1.3 (como unidad de procesamiento) y el bloque de alimentación. El acoplamiento de los dispositivos mencionados se realiza por medio de los pines de propósito general, interfaces de comunicación UART, SPI e interfaces USB, razón por la cual es necesario ampliar el puerto micro USB de la Raspberry pi v1.3 por medio de un hub USB de al menos 2 puertos [9]. Para la comunicación con el módulo de cámara se utiliza un cable ribbon que se conecta directamente a la interfaz SCI de la tarjeta Raspberry Pi v1.3 y se habilita la interfaz mediante la configuración principal del sistema insertando el comando `raspi-config` [10].

El sensor MQ-2 dispone de una salida de datos de tipo analógico y tiene aplicaciones versátiles debido a que permite la detección de varios gases con tan solo variar la curva característica de sensibilidad proporcionada por el fabricante como se indica en la Figura 3. Razón por la cual, para detectar específicamente la presencia o ausencia de humo, el sensor deberá responder a la siguiente ecuación de sensibilidad:

$$\text{Humo} = 3891.1 \left(\frac{R_s}{R_o} \right)^{-2.228} \quad (1)$$

Dónde:

R_o : es la resistencia del sensor a 1000 ppm de H₂ en aire limpio.

R_s : es la resistencia del sensor ante la presencia de gas.

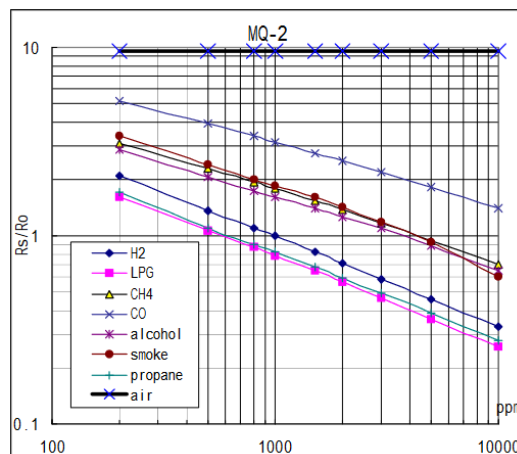


Figura 3. Curva de sensibilidad del sensor MQ-2 [11].

En referencia al módulo de conexión inalámbrica XBee S3B, cada dispositivo posee una dirección MAC única e irrepetible, que es empleada para el direccionamiento de los dispositivos pues soportan topologías de red punto a punto, punto a multipunto y malla. Además, poseen potencia de transmisión configurable obteniendo salidas de 7, 15, 18, 21 y 24 dBm [12]. La mini-red de detección emplea la topología punto a multipunto para la comunicación inalámbrica, es decir; los nodos Sensoriales tienen interacción únicamente con el nodo Coordinador, mientras que este último enviará mensajes de *broadcast* a los nodos cambiándolos a un estado de actividad para constatar la presencia de un conato de incendio forestal. En la Tabla 1 se presentan los principales parámetros de configuración ingresados en cada módulo XBee S3B con la ayuda del software XCTU y el XBee Explorer.

La tarjeta Raspberry Pi v1.3 de los nodos transmisores se encargan de la ejecución simultánea de varios scripts de Python como se indica en la Figura 4 y los cuales se describen a continuación:

- Adquisición periódica de temperatura, humedad y humo del entorno de prueba y generación del vector promedio de información meteorológica.
- Verificación el valor promedio de la variable de humo, en caso de no superar un umbral establecido, el vector de información es almacenado localmente en un archivo de texto, por el contrario, si, se supera el umbral impuesto se procede con el envío de datos habilitando el puerto serie `ttyUSB0` al cual está

conectado el módulo XBee S3B, transmitiendo el vector de información al nodo coordinador del subsistema de Recepción.

- Adquisición de datos de posicionamiento GPS y activación del módulo de cámara para obtener captura fotográfica de constatación visual de presencia de un conato de incendio forestal.
- Escritura de la última posición GPS en la parte superior de la fotografía, almacenamiento local, codificación en texto (Base64) y transmisión al nodo coordinador en pequeñas tramas, en la Figura 4 se presenta el fragmento de código utilizado. Para realizar la codificación de datos a Base64 se utiliza la librería de Python “base64.b64encode”, la cual requiere como argumento leer el archivo original en modo binario mediante la opción “rb” [13].

Tabla 1. Parámetros de configuración módulos XBee Pro S3B.

Parámetro	Nodo 1	Nodo 2	Coordinador
Firmware	8071	8071	8071
MAC SH	0013A200	0013A200	0013A200
MAC SL	40E309F7	40E309FB	40E30A0C
MAC DH	0013A200	0013A200	0
MAC DL	40E30A0C	40E30A0C	FFFF
Id de Red	7FFF	7FFF	7FFF
Baud Rate	115200	115200	115200
Nivel de Potencia	Highest (4)	Highest (4)	Highest (4)

Fuente: Elaboración propia.

```
#Lectura de la ultima linea de coordenadas.txt
pos=file("/home/pi/Monitoreo/coordenadas2.txt", "r")
ultima= pos.readlines()[-1]
print(str(ultima))

#Nombre local de almacenamiento
localNamePic=filepath+"/"+PrefixPic+horaArchivo+".jpg"
#-----
#Captura de fotografia y superposicion de texto
with picamera.PiCamera(resolution=(410,310)) as foto:
    time.sleep(0.05)
    foto.rotation=180
    foto.annotate_text= ultima
    foto.annotate_text_size=10
    foto.capture(localNamePic)
    foto.close()
    print "Foto capturada %s"%localNamePic

#Lazo de codificacion y envio de imagenes
#Abrir archivo en modo binario
with open(localNamePic,"rb") as imageFile:
    #codificacion de imagenes a texto
    texto_codif=base64.b64encode(imageFile.read())
    print len(texto_codif)
```

(a)

```
#Iteracion de envio
for datos in texto_codif:
    cadena=cadena+datos
    dato_enviar=dato_enviar+1
    #Tamaño de las cadenas de texto
    if dato_enviar>100:
        #print cadena
        nueva_cadena=nueva_cadena+cadena
        #escritura en el puerto serie
        s.write(cadena)
        #tiempo de espera
        time.sleep(0.040)#0.050
        dato_enviar=0
        cadena=""
```

(b)

Figura 4. (a) Fragmento de código de captura fotográfica y codificación a Base 64; (b) Fragmento de código segmentación de tramas y envío de captura fotográfica [14].

3.2. Sistemas de Recepción

El sistema está conformado principalmente por una tarjeta Raspberry Pi 2B, un módulo XBee S3B y un modem 3G USB, a diferencia de los nodos transmisores, se requiere de mayor procesamiento y memoria RAM para realizar la conexión a internet mediante la red de telefonía móvil UMTS o GPRS. Este sistema se encarga de recibir la información proveniente del sistema transmisor, identifica la fuente de origen y almacena la información localmente y en las tablas de MySQL del servidor web alojado en una instancia EC2 de la nube de AWS.

Las tramas que componen la fotografía de constatación son receptadas, decodificadas en base 64 como se indica en la Figura 5 y finalmente son transferidas remotamente al servidor web usando el protocolo de copia segura (SCP). Dependiendo de cuan alejado se encuentren los nodos transmisores del receptor y la densidad boscosa del área de prueba existirán pérdidas de absorción, difracción y reflexión que ocasionen que las tramas de información no lleguen completas al destino, generando problemas de distorsión en la regeneración de imágenes

o a su vez pérdida completa de la fotografía. En el segmento de código de la Figura 5, se presenta el proceso de recepción de tramas de imágenes y decodificación. Una vez que la fotografía ha sido decodificada se la transfiere a un directorio del servidor en la nube mediante el módulo scp de Python, mismo que recibe como argumentos la llave de acceso al servidor remoto (archivo .pem), la ruta local del archivo seguido del host y la ubicación remota, como se indica en la sentencia a continuación: `os.system('sudo scp -r i servidoraws.pem "%s" ubuntu@52.15.115.xx:/vaar/www/html/Capturas_Nnodo1' %nombre_fotografía).`

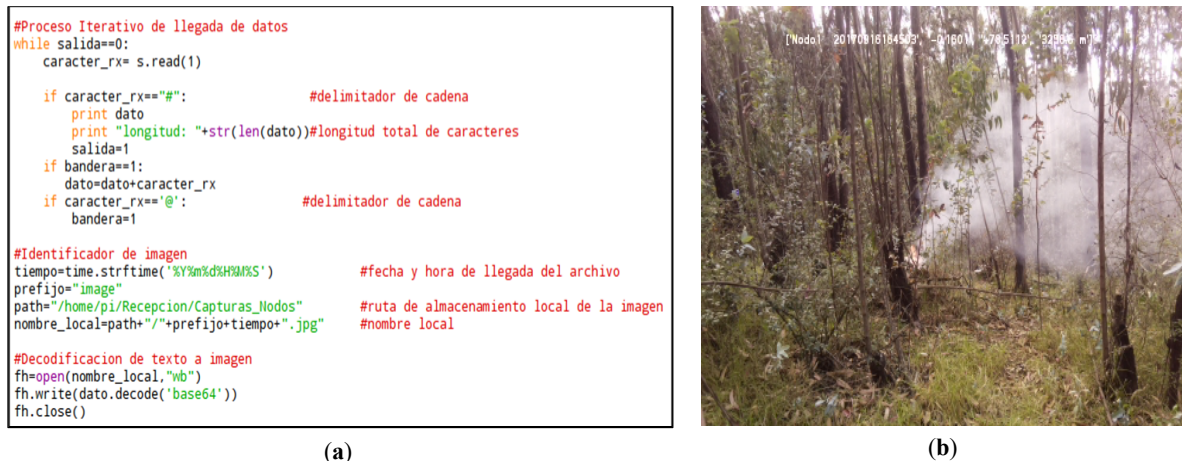


Figura 5. (a) Segmento de código recepción y decodificación de captura fotográfica; (b) Imagen decodificada [14].

El nodo Coordinador también es el encargado de alertar al usuario final sobre la presencia de un posible conato de incendio mediante un mensaje de texto sms, el cual incluye en su contenido la dirección URL del servidor web de visualización. El envío de sms se realiza mediante el comando “AT+CMGS”, que recibe como parámetros el número del destinatario, y el contenido del mensaje.

3.3. Sistema de Almacenamiento y Visualización

Este sistema permite almacenar, visualizar y administrar la información del nodo coordinador por medio de una aplicación web de tal manera que los usuarios finales interpreten fácilmente los datos adquiridos del escenario de pruebas. El servidor web se ejecuta sobre el entorno virtual de *Amazon Web Services* en una instancia EC2 (*Amazon Elastic Compute Cloud*) debido a que proporciona una plataforma de tamaño escalable, seguro y permite elegir varios tipos de sistemas operativos y paquetes de software [14]. Adicionalmente la primera instancia de AWS a la que se accede es gratuita durante 12 meses y permite admitir el uso de una dirección IP pública.

Para el despliegue del servidor se ha optado por el sistema operativo Ubuntu sobre el cual se montará un servidor LAMP, previo a cualquier configuración e instalación se recomienda asociar una dirección IP elástica a la instancia EC2, facilitando el uso de servicios de transferencia de archivos, servicios web entre otros. El término dirección IP Elástica hace referencia al conjunto de direcciones IP estáticas diseñadas para informática en la nube dinámica. A diferencia de las tradicionales direcciones IP estáticas, las direcciones IP elásticas enmascaran errores en instancias reasignando de forma programada las direcciones IP públicas a cualquier instancia de una cuenta sin necesidad de esperar al personal técnico que reconfigure los parámetros de red [15, 16]. Esta operación garantiza el direccionamiento del tráfico de datos hacia una dirección IP fija, evitando el cambio constante de dirección con cada arranque del sistema operativo, cuyo efecto puede producir pérdida de información y dificultad en la automatización de scripts del nodo coordinador. La configuración de IP Elástica se realiza a través del panel de administración de EC2 ingresando en la opción “*Elastic IPs*” seguido de “*Allocate new address*” y por último “*EC2*” que corresponde con el tipo de instancia al que se va a asociar. La asociación de la IP elástica con la instancia se logra al escoger la opción “*Associate Address*”, en el caso de poseer más de una instancia se deberá seleccionar el identificador de la instancia con la que se va a trabajar, en la Figura 6 se presentan los parámetros de configuración utilizados.

Figura 6. Asociación IP elástica con instancia AWS-EC2.

El almacenamiento y gestión de datos está a cargo de MySQL juntamente con PhpMyAdmin garantizando disponibilidad e integridad de la base de datos. Generalmente la instancia EC2 solo permite el acceso local a la base de datos de MySQL, es decir, desde el mismo servidor y no desde un equipo externo, sin embargo, existe la posibilidad de acceder desde un equipo remoto creando un usuario con todos los permisos y se modifica los puertos de la instancia EC2 como se indica a continuación:

- Primero se modifica el archivo de configuración de MySQL ingresando el comando “nano /etc/mysql/mysql.conf.d/mysqld.cnf”, dentro del archivo se busca la línea “bind-address” y se cambia por la dirección IP “0.0.0.0” permitiendo el acceso remoto a cualquier dispositivo que se autentique con las credenciales correctas.
- Una vez modificado el archivo de MySQL se configura la sección “Security Groups” de la instancia AWS, es necesario añadir una regla “Inbound”, que escuche peticiones de cualquier dirección IP con puerto MySQL/Aurora (3306).

Para la visualización de información se emplea el servidor web Apache y los lenguajes de programación PHP, HTML y CSS para la creación de la aplicación web, misma que cuenta con 2 elementos principales: Tablas de datos de los nodos transmisores y galería dinámica que se encarga de mostrar las imágenes de constatación de conato de incendio, esta galería mostrará la imagen reciente y el conjunto de imágenes previamente almacenadas en los repositorios del servidor, tal como se observa en la Figura 7.

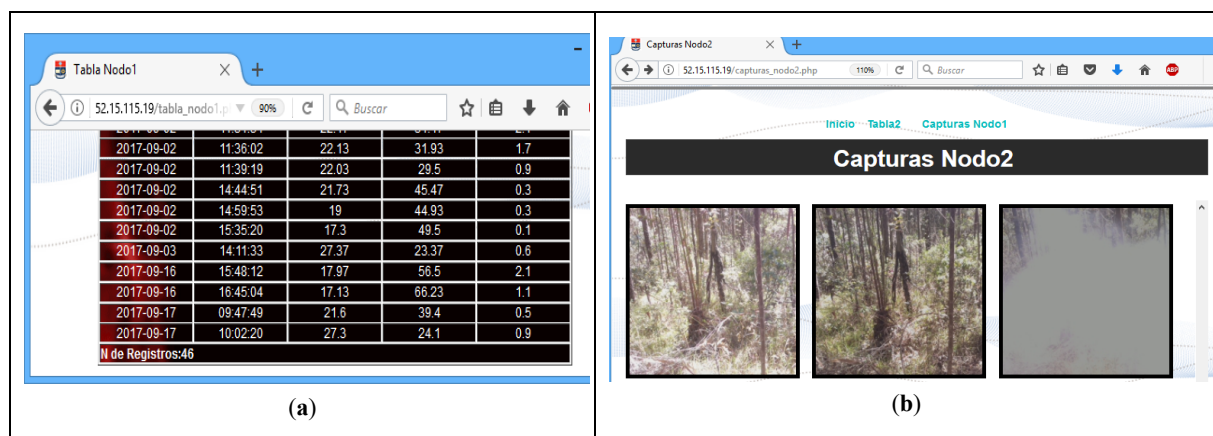


Figura 7. (a) Tablas de Datos de nodos transmisores; (b) Galería dinámica de fotografías de constatación [14].

Los nodos de la mini-red están diseñados para operar en ambientes outdoor y deben mantener la carga útil del sistema de alimentación constante con una salida de 5 V y 1.5 A durante periodos extensos de tiempo, no obstante, dependiendo del tiempo de muestreo y la activación de los dispositivos la duración de las baterías del sistema se reduce considerablemente. Para contrarrestar el problema de energía los nodos disponen de controladores de carga y paneles solares que ayudan a recargar las baterías manteniendo la operatividad de manera autónoma. En la Figura 8 se visualiza la integración de todos los componentes de hardware open source de los nodos y se presentan los elementos que conforman la mini-red en conjunto con el sistema de alimentación autosustentable.

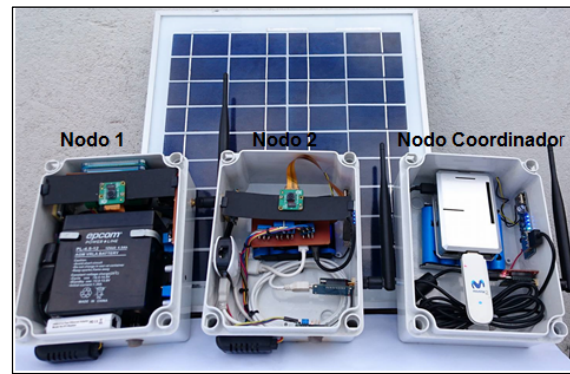


Figura 8. Nodos de la mini red implementados [14].

4. Resultados

La mini-red se instaló en un ambiente outdoor en donde se disponía de un entorno de alta densidad boscosa constituida en su gran mayoría por árboles de eucalipto y abundantes matorrales interandinos compuestos por kikuyo, chilca, pumamaqui, entre otros. Para la verificación de funcionamiento de la implementación se llevaron a cabo pruebas de operatividad, alcance y pérdida de paquetes, además de realizar incendios forestales controlados a microescala con ayuda de los organismos de prevención y socorro

4.1 Alcance de la mini-red

Con el objetivo de determinar el alcance máximo entre los nodos transmisores y el nodo coordinador se realizaron pruebas en zonas de alta densidad boscosa y zonas de abundantes matorrales con baja o poca densidad boscosa. Los módulos XBee S3B encargados de la comunicación inalámbrica entre nodos trabajan en una topología punto a multipunto y operan en la banda de frecuencia ISM a 900 MHz con una salida de potencia de 24 dBm.

En el primer escenario el nodo coordinador se mantiene fijo como posición de referencia a una altura de 5 [m] sobre el nivel del suelo y se desplazan los nodos transmisores 1 y 2 por la mesa de pruebas ubicándolos a una altura de 2 [m] con el propósito de detectar incendios forestales de tipo superficial. En la Figura 9 (a) se presenta el alcance máximo de 150 [m] conforme la recepción de tramas es exitosa en el nodo coordinador, en este escenario las pérdidas por reflexión y absorción dificultan el proceso de recepción el cual al perder gran cantidad de tramas puede ocasionar retardos o encolamiento de tramas, haciendo que el nodo coordinador no procese la información generando imágenes distorsionadas alejadas de la realidad y una vez decodificadas en el peor de los casos la imagen no se puede reconstruir obteniendo como resultado un archivo de extensión .jpg de 0 bytes.

Para el segundo escenario constituido por abundantes matorrales se obtienen mayores distancias de alcance obteniendo un máximo de 1200 [m] como se indica en la Figura 9 (b), este resultado se debe principalmente a que en este escenario de pruebas se tiene línea de vista completamente despejada evitando las pérdidas de dispersión y absorción, aun así, se recomienda instalar el nodo coordinador a una altura de 5 [m] sobre el nivel del suelo.

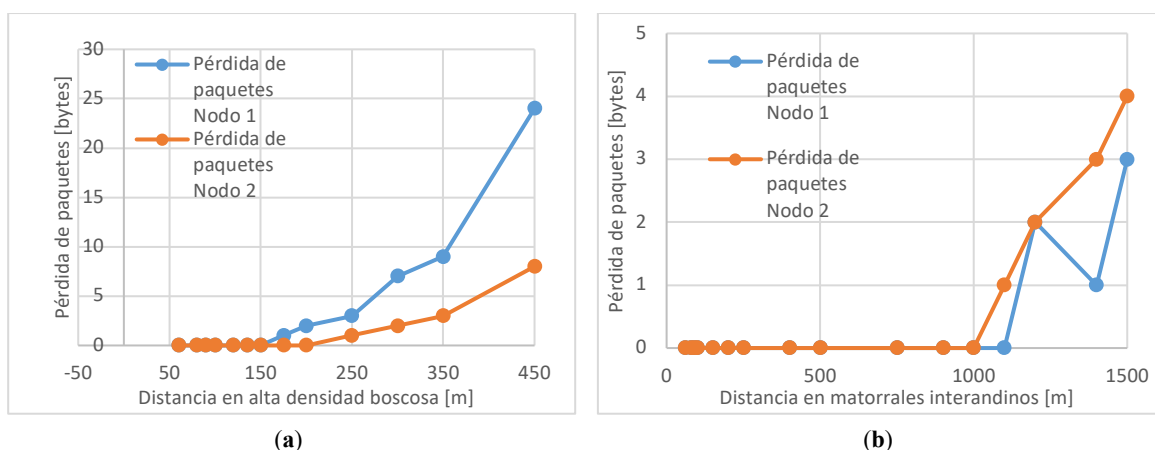


Figura 9. Pérdida de paquetes en función de la distancia (a) Alta densidad boscosa; (b) Matorrales interandinos.

Si, se considerase únicamente el envío de una trama de datos de variables meteorológicas la zona de cobertura de la mini-red fuese mucho más extensa, esto se debe a que al tener menor cantidad del PDU se disminuye la probabilidad de error en la recepción en el nodo coordinador. En referencia al comportamiento de los sensores la adquisición de variables de temperatura y humedad permiten generar una alarma de conato de incendio, no obstante, puede estar sujeta a falsas alarmas, motivo por el cual la lectura de partes por millón de material particulado del sensor de humo es muy importante para discriminar la presencia de un conato de incendio. Si bien se ha estimado la curva de comportamiento del sensor para un entorno *outdoor* las variaciones de velocidad y dirección del viento propias del entorno dificultan la lectura de este, sin embargo, si las columnas de humo son lo suficientemente densas el sensor capta las variaciones y dispara el evento de captura fotográfica que evidencia con una gran precisión la efectividad de la alarma además de estimar la magnitud de la alerta.

4.2 Tiempos de muestreo

La Figura 10 evidencia como un mismo suceso de detección presenta variaciones en su comportamiento debido a los diferentes tiempos de muestreo de datos, mientras mayor número de muestras se analice mejores resultados de detección se obtendrán. Considerando un tiempo de detección de 1 [min] se observan concentraciones de humo de hasta 7.5 [ppm] generando 6 alertas, por otro lado, con un tiempo de 3 [min] de detección se observan valores de hasta 4.9 [ppm] generando 3 alertas, mientras que a un tiempo de detección de 5 [min] el mismo evento logra alcanzar apenas concentraciones de 1.9 [ppm] y genera 2 mensajes de alerta. Las curvas de comportamiento obtenidas en las pruebas determinan, que la mayor concentración de humo se presenta en la fase inicial del incendio forestal, pues el humo es uno de los primeros productos en el proceso de combustión y depende de los factores: humedad relativa del entorno, humedad de los combustibles y magnitud del siniestro.

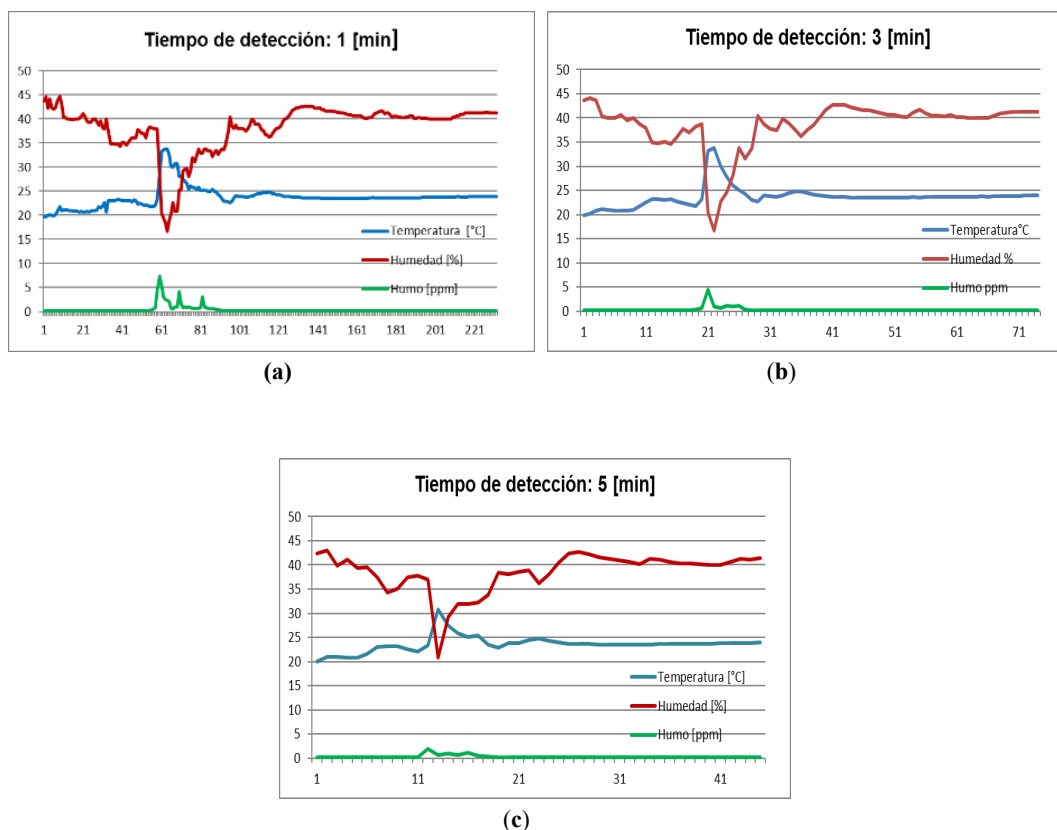


Figura 10. Eventos de detección en función del tiempo de monitoreo (a) Tiempo de detección: 1min; (b) Tiempo de detección: 3 min; (c) Tiempo de detección: 5m.

El tiempo de adquisición está relacionado directamente con el consumo energético, mediante la realización de pruebas se determina los siguientes tiempos de duración de un pack de batería solar de 20000 [mAh]:

- 1 [min] de detección: alrededor de 18 horas en continuo funcionamiento.
- 3 [min] de detección: alrededor de 36 horas en continuo funcionamiento.
- 5 [min] de detección: alrededor de 60 horas en continuo funcionamiento.

Para la determinación del consumo de potencia de cada nodo se considera una relación asimétrica debido a la existencia de elementos que tienen consumo energético permanente (DHT-22, MQ-2, GPS, XbeeExplorer, Hub USB) y esporádico (Xbee S3B, Cámara). En la Tabla 2, se presenta el consumo total de un nodo transmisor cuando todos sus dispositivos se encuentran en operación.

Tabla 2. Consumo de potencia de los componentes del nodo transmisor.

Elementos	Cantidad	Corriente [mA]	Voltaje [V]	Potencia [mW]
Raspberry Pi zero v1.3	1	100	5	500
Hub USB-Eth	1	97	5	485
Xbee +Xbee Explorer	1	56	3,3	184,8
MQ-2	1	80	5	400
DHT-22	1	16	3,3	52,8
GPS	1	86	3,3	283,8
Total		435		1906,4

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

Se implementó una mini-red inalámbrica con tecnología actual de tipo open source de alto procesamiento, bajo costo y consumo energético para dar solución a una problemática ambiental de alto impacto permitiendo alertar brevemente a los organismos de socorro la presencia de un conato de incendio. Además, se ha comprobado que las redes WSN pueden alcanzar grandes distancias de cobertura abarcando distancias de 1,2 Km en entornos con línea de vista despejada y 150 m en zonas altamente boscosas considerando gran cantidad de tramas de envío producto del proceso de codificación y segmentación de una fotografía de resolución de 410 x 310 pixeles.

Se comprobó mediante la variación del tiempo de adquisición de muestras la precisión de sensado de los nodos transmisores, haciendo evidente también la demanda de consumo energético debido a la operatividad continua de los componentes disminuyendo considerablemente la carga útil de la batería del sistema.

Al generar alarmas de detección de incendios forestales vía SMS, el usuario final comprueba que la información presentada en la aplicación web es de fácil entendimiento y adicionalmente las fotografías aun cuando son de baja resolución permiten efectivamente discriminar la presencia de un conato de incendio, permitiendo notificar a los organismos de socorro de forma inmediatamente y con exactitud en donde se produce el siniestro.

Se puede mejorar el rendimiento de la mini-red realizando procesamiento de imágenes en los nodos transmisores de tal manera que el módulo de cámara actúe como un sensor más del nodo, detectando columnas de humo evitando la emisión de falsas alarma además de mejorar la resolución de la fotografía. Adicionalmente, se puede realizar mecanismos de control de tramas enviadas haciendo procesos de retransmisión con el objetivo que en el proceso de decodificación en el nodo coordinador no se produzca archivos defectuosos o de tamaño de 0 bytes.

6. Referencias

- [1] Secretaría de Gestión de Riesgos. (2022). *Incendios Forestales*. <http://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendios-forestales/>
- [2] Comisión Nacional Forestal. (2010). *Incendios Forestales, Guía práctica para comunicadores*. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>

- [3] González Ulibarry, P. (2017). Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna. *Biblioteca Del Congreso Nacional De Chile*, (SUP11507), 1-8.
<https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=39186>
- [4] Herrera, C., Dien Tran, T., Egas, C., Pereira, V., Sá Silva, J. (2016), Reliability in Wireless Sensor Networks for Environment Monitoring, *Revista Politécnica*, 37 (1), 1-7.
https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/621
- [5] Yang, S. H. (2014). *Wireless Sensor Networks Principles, Design and Applications*. Springer.
- [6] Rani, S., Sai, V., Maheswar, R. (2022). *IoT and WSN bases Smart Cities: A machine learning perspective*. Springer.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2007). *Draft Amendment to IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS): Amendment to Add Alternate Phy (Amendment of IEEE Std 802.15.4)*. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4040997>
- [8] Zigbee. (2021). *Connectivity standards alliance*. <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/>
- [9] Raspberry Pi. (2021). *Raspberry Pi Zero*. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero/>
- [10] Raspberry Pi. (2021). *Introducing the Raspberry Pi cameras*.
<https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>
- [11] Hanwei Electronics C.O. LTD. (2022). *Technical Data MQ-2 Gas Sensor*.
<https://www.mouser.com/datasheet/2/321/605-00008-MQ-2-Datasheet-370464.pdf>
- [12] DIGI. (2022). *Digi XBee-Pr 900HP*. https://www.digi.com/pdf/ds_xbeepr900hp.pdf
- [13] Python. (2022). *Base64- Base 16, Base32, Base 64, Base 85, Data Encodings*.
<https://docs.python.org/es/3/library/base64.html>
- [14] Tatayo Vinuesa, E. (2017). *Implementación de una mini-red de sensores inalámbricos para detección temprana de incendios forestales utilizando hardware y software open source* [Tesis de Grado]. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19022>
- [15] Amazon AWS. (2022). *Amazon EC2*. <https://aws.amazon.com/es/ec2/>
- [16] Amazon AWS. (2022). *Direcciones IP elástica*.
https://docs.aws.amazon.com/es_es/AWSEC2/latest/UserGuide/elastic-ip-addresses-eip.html