



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
MONITORIZACIÓN DE INCENDIOS PARA LA PREVENCIÓN DE
PÉRDIDAS FORESTALES EMPLEANDO UNA RED DE SENSORES
INALÁMBRICOS**

AUTOR: LÓPEZ TORO, WILLAN ANDRÉS

**DIRECTOR: ING. VIZCAINO, PATRICIO MSc.
CODIRECTOR: ING. GUALSAQUÍ, MARCO MSc.**

**SANGOLQUÍ
2015**

Certificado de tutoría

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO

Ing. Patricio Vizcaino E. MSc.

Ing. Marco Gualsaquí M. MSc.

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE INCENDIOS PARA LA PREVENCIÓN DE PÉRDIDAS FORESTALES EMPLEANDO UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS", realizado por Willan Andrés López Toro, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en su reglamento.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación

Sangolquí, 19 - AGOSTO 2015



Ing. Patricio Vizcaino E. MSc.

DIRECTOR



Ing. Marco Gualsaquí M. MSc.

CODIRECTOR

Declaración de Responsabilidad

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS–ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

WILLAN ANDRÉS LÓPEZ TORO

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE INCENDIOS PARA LA PREVENCIÓN DE PÉRDIDAS FORESTALES EMPLEANDO UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS" ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 19 de agosto del 2015



Willan Andrés López Toro

Autorización de Publicación

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, WILLAN ANDRÉS LÓPEZ TORO

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE INCENDIOS PARA LA PREVENCIÓN DE PÉRDIDAS FORESTALES EMPLEANDO UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 19 de agosto del 2015



Willan Andrés López Toro

DEDICATORIA

A mi familia, por su confianza, su amor y apoyo incondicional, siempre supieron alentarme en los buenos y malos momentos que viví en esta etapa de estudiante. A pesar de la distancia, su espíritu de fuerza siempre estuvo conmigo guiándome hasta conseguir este triunfo como un gran profesional. A mis amigos y compañeros gracias por sus consejos exigentes para lograr este sueño.

Willan A. López T.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme siempre la salud, la fuerza y la sabiduría para hacer las cosas que me he propuesto. Por llevarme siempre de su mano y no dejarme decaer en los momentos difíciles que tuve que superar. A mis padres Susana y Ramiro que me dieron la vida, el amor, el cuidado y las enseñanzas necesarias para crecer como persona honesta y luchadora. A uds gracias por su esfuerzo y sacrificio infinito, que hicieron durante todo este tiempo con la ilusión de verme un día realizado como un gran profesional. A mis hermanos Iván y Jhonny porque ustedes siempre vieron en mí un ejemplo de superación y nunca los defraudé, esa motivación me hizo una persona más perseverante. A mi familia que me ayudó a priorizar mis obligaciones, gracias a ustedes entendí cuales son las cosas importantes que debo hacer antes de empezar otra etapa en mi vida. A mi novia Rossem por su amor incondicional y su apoyo constante todos los días, en las buenas y en las malas siempre quisiste que cumpla mis metas. A mis amigos por su exigencia y aliento para que cumpla mis objetivos. Y a mis directores Patricio Vizcaino y Marco Gualsaquí por su ayuda, su dedicación y orientación en esta etapa de superación profesional; les agradezco infinitamente por su tiempo y paciencia para lograr este sueño.

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| CERTIFICADO DE TUTORÍA..... | ii |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD..... | iii |
| AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN..... | iv |
| DEDICATORIA..... | v |
| AGRADECIMIENTO..... | vi |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | vii |
| RESUMEN..... | xiii |
| ABSTRACT..... | xiv |
| GLOSARIO..... | xv |

CAPITULO 1

| | |
|--------------------------------------|----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA..... | 3 |
| 1.3 ALCANCE..... | 4 |
| 1.4 OBJETIVOS..... | 5 |
| 1.4.1 Objetivo General..... | 5 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos..... | 5 |

CAPITULO 2

| | |
|-------------------------------------|----------|
| FUNDAMENTO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1 INCENDIOS FORESTALES..... | 6 |
| 2.2 COMPONENTES DE UN INCENDIO..... | 6 |
| 2.3 PROPAGACIÓN DE UN INCENDIO..... | 7 |
| 2.3.1 Radiación..... | 7 |
| 2.3.2 Convección..... | 7 |
| 2.3.3 Conducción..... | 7 |

| | | |
|--------|-------------------------------------|----|
| 2.4 | TIPO DE INCENDIOS FORESTALES..... | 8 |
| 2.4.1 | De Subsuelo..... | 9 |
| 2.4.2 | De Suelo..... | 10 |
| 2.4.3 | De copas..... | 10 |
| 2.5 | COMPORTAMIENTO DEL FUEGO..... | 10 |
| 2.5.1 | Topografía..... | 11 |
| 2.5.2 | Tiempo Atmosférico..... | 11 |
| 2.5.3 | Combustible..... | 11 |
| 2.6 | CAUSAS..... | 11 |
| 2.6.1 | Negligencias..... | 11 |
| 2.6.2 | Casos Fortuitos..... | 12 |
| 2.6.3 | Intencionado..... | 12 |
| 2.6.4 | Desconocidos..... | 12 |
| 2.7 | MÉTODOS DE PREVENCIÓN..... | 12 |
| 2.8 | TECNOLOGÍA ZIGBEE..... | 13 |
| 2.8.1 | Origen..... | 13 |
| 2.8.2 | Relación Zigbee / IEEE802.15.4..... | 14 |
| 2.8.3 | Estándar IEEE 802.15.4..... | 15 |
| 2.8.4 | Zigbee Alliance..... | 15 |
| 2.8.5 | Arquitectura Zigbee..... | 15 |
| 2.9 | REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS..... | 17 |
| 2.9.1 | Características..... | 18 |
| 2.9.2 | Elementos..... | 18 |
| 2.10 | ESTRUCTURA DE UN NODO SENSOR..... | 19 |
| 2.10.1 | Unidad de Proceso..... | 20 |
| 2.10.2 | Memoria..... | 20 |
| 2.10.3 | Módulo Sensor..... | 21 |
| 2.10.4 | Tranceiver..... | 21 |
| 2.10.5 | Sistema de Alimentación..... | 21 |
| 2.11 | TIPOS DE NODOS..... | 21 |

| | | |
|--------|---------------------------------|----|
| 2.11.1 | Coordinador..... | 22 |
| 2.11.2 | Router..... | 22 |
| 2.11.3 | Dispositivo Final..... | 22 |
| 2.12 | TOPOLOGÍAS DE RED..... | 23 |
| 2.12.1 | Estrella..... | 23 |
| 2.12.2 | Árbol..... | 23 |
| 2.12.3 | Punto-Punto..... | 24 |
| 2.12.4 | Malla..... | 24 |
| 2.13 | PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO..... | 24 |
| 2.13.1 | Protocolo DSDV..... | 25 |
| 2.13.2 | Protocolo AODV..... | 25 |
| 2.13.3 | Protocolo DSR..... | 25 |

CAPITULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 3.1 | ARQUITECTURA DEL SISTEMA..... | 26 |
| 3.1.1 | Etapa de Red..... | 26 |
| 3.1.2 | Etapa de Servidor..... | 26 |
| 3.1.3 | Etapa de Usuario..... | 26 |
| 3.2 | CONFIGURACIÓN DE LA RED..... | 27 |
| 3.2.1 | Protocolo de Enrutamiento..... | 27 |
| 3.2.2 | Topología..... | 28 |
| 3.3 | CONFIGURACIÓN DE LOS NODOS..... | 28 |
| 3.3.1 | Banda de Operación..... | 29 |
| 3.3.2 | Potencia de Transmisión..... | 29 |
| 3.3.3 | Sensibilidad..... | 30 |
| 3.3.4 | Frecuencia de Muestreo..... | 30 |
| 3.3.5 | Sistema de Alimentación..... | 31 |
| 3.4 | EQUIPOS DISPONIBLES..... | 32 |
| 3.4.1 | Características del Hardware..... | 33 |

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 3.4.2 | Nodos..... | 33 |
| 3.4.3 | Sensores..... | 34 |
| 3.4.4 | Gateway..... | 36 |
| 3.4.5 | Estación Base..... | 36 |
| 3.4.6 | Interfaz Gráfica..... | 37 |
| 3.5 | FACTORES AMBIENTALES A MEDIRSE..... | 37 |
| 3.5.1 | Temperatura Ambiente..... | 38 |
| 3.5.2 | Humedad Relativa..... | 38 |
| 3.5.3 | Dióxido de Carbono..... | 39 |

CAPITULO 4

| | | |
|-------|--|-----------|
| | IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO..... | 40 |
| 4.1 | SELECCIÓN DEL ESCENARIO DE PRUEBA..... | 40 |
| 4.1.1 | Ubicación Geográfica..... | 40 |
| 4.1.2 | Características del Escenario..... | 41 |
| 4.1.3 | Dimensionamiento Físico..... | 42 |
| 4.2 | MATERIALES..... | 43 |
| 4.2.1 | Materiales de Acoplamiento..... | 43 |
| 4.2.2 | Materiales de simulacro de incendio..... | 44 |

CAPITULO 5

| | | |
|-------|---|-----------|
| | PRUEBAS Y RESULTADOS..... | 45 |
| 5.1 | PLANIFICACIÓN DEL EXPERIMENTO..... | 45 |
| 5.1.1 | Objetivos del Experimento..... | 45 |
| 5.1.2 | Definición de Variables..... | 46 |
| 5.1.3 | Procedimiento Experimental..... | 46 |
| 5.2 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 55 |
| 5.2.1 | Correlación de Variables Respuesta..... | 55 |
| 5.2.2 | Análisis de Pruebas..... | 57 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| CONCLUSIONES..... | 59 |
|--------------------------|-----------|

| | |
|-----------------------------|-----------|
| RECOMENDACIONES..... | 60 |
|-----------------------------|-----------|

| | |
|--|-----------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 61 |
|--|-----------|

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla. 2.1. Distribución de Frecuencias de trabajo para IEEE 802.15.4..... | 16 |
|--|----|

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|---|
| Figura. 2.1. Formas de Propagación del Fuego..... | 8 |
|---|---|

| | |
|--|---|
| Figura. 2.2. Incendio de superficie..... | 9 |
|--|---|

| | |
|-------------------------------------|---|
| Figura. 2.3. Incendio de Copas..... | 9 |
|-------------------------------------|---|

| | |
|---|----|
| Figura. 2.4. Incendios de Subsuelo..... | 10 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 2.5. Modelo de Referencia ZigBee y 802.15.4..... | 14 |
|--|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| Figura. 2.6. Elementos de la WSN..... | 19 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 2.7. Estructura de un Nodo Sensor..... | 20 |
|--|----|

| | |
|-------------------------------------|----|
| Figura. 2.8. Topologías de Red..... | 23 |
|-------------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| Figura. 3.1. Arquitectura del Sistema de Monitoreo..... | 27 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 3.2. Topología Híbrida (Malla-Estrella)..... | 28 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura. 3.3. Canales IEEE 802.15.4..... | 29 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Figura. 3.4. Frecuencia de muestreo de los nodos..... | 30 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 3.5. Sistema de Alimentación de los Nodos..... | 31 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 3.6. Batería Recargable de 6V..... | 32 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura. 3.7. Circuito Regulador de Voltaje..... | 32 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 3.8. Estructura de un Nodo IRIS M2110..... | 33 |
|--|----|

| | |
|------------------------------------|----|
| Figura. 3.9. Tarjeta MDA300CA..... | 34 |
|------------------------------------|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| Figura. 3.10. Sensor de gas MQ-2..... | 35 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 3.11. Circuito de Acondicionamiento del Sensor MQ-2..... | 35 |
|--|----|

| | |
|-----------------------------------|----|
| Figura. 3.12. Gateway MIB520..... | 36 |
|-----------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| Figura. 3.13. Servidor de Datos (X-Serve)..... | 36 |
| Figura. 3.14. Interfaz Gráfica de Usuario (Moteview)..... | 37 |
| Figura. 3.15. Registro higrotermográfico de la temperatura y humedad relativa..... | 39 |
| | |
| Figura. 4.1. Vista Satelital de la Ubicación de la Red..... | 41 |
| Figura. 4.2. Escenario de Implementación..... | 42 |
| Figura. 4.3. Dimensionamiento Físico de la Red..... | 42 |
| Figura. 4.4. Acoplamiento del Nodo..... | 43 |
| Figura. 4.5. Materiales para simulacro de Incendio..... | 44 |
| | |
| Figura. 5.1. Escenario de Prueba 1..... | 47 |
| Figura. 5.2. Resultados de Prueba 1..... | 48 |
| Figura. 5.3. Escenario de Prueba 2..... | 49 |
| Figura. 5.4. Resultados de Prueba 2..... | 50 |
| Figura. 5.5. Escenario de Prueba 3..... | 51 |
| Figura. 5.6. Resultados de Prueba 3..... | 52 |
| Figura. 5.7. Escenario de Prueba 4..... | 53 |
| Figura. 5.8. Resultados de Prueba 4..... | 54 |
| Figura. 5.9. Correlación Temperatura – Humedad Relativa..... | 55 |
| Figura. 5.10. Correlación Temperatura – Dióxido de Carbono..... | 56 |
| Figura. 5.11. Correlación Humedad Relativa – Dióxido de Carbono..... | 56 |

RESUMEN

El presente proyecto contempla el estudio de una de las mayores catástrofes ambientales que ocurren año tras año como son los incendios forestales que han dejado sus enormes consecuencias tras su propagación en nuestro medio. La investigación sobre su comportamiento y los métodos actuales que se utilizan para el monitoreo de este tipo de desastres, nos han demostrado un porcentaje de ineficiencia para detectar de manera oportuna indicios de fuego que posteriormente se propagan a manera de incendios forestales de gran magnitud. Ante esto surge la necesidad de diseñar un sistema de monitoreo de incendios forestales basándonos en la Tecnología Zigbee, cuyas características nos permitieron desarrollar una red inalámbrica (WSN) de sensores auto-organizable, que nos aseguró la comunicación entre todos sus dispositivos bajo una topología inteligente y de bajo consumo de energía. La implementación de la red nos permitió censar y recolectar la información de la temperatura ambiente, la humedad relativa y las concentraciones de dióxido de carbono presentes en un simulacro de incendio forestal. Toda esta información se la almacenó en una base de datos para luego ser visualizada en una interfaz gráfica con la finalidad de permitirle al usuario observar la variación de estas condiciones ambientales y según sea su comportamiento poder deducir el origen de un incendio forestal. Finalmente a través de las pruebas realizadas con el sistema implementado detectamos la presencia de un foco fuego cuando de manera inmediata la temperatura ambiente empieza a subir, la humedad relativa disminuye y las concentraciones de dióxido de carbono superan significativamente su valor promedio en condiciones normales.

PALABRAS CLAVES:

- **INCENDIOS FORESTALES**
- **TECNOLOGÍA ZIGBEE**
- **RED WSN**
- **CONDICIONES AMBIENTALES**
- **BASE DE DATOS**

ABSTRACT

This project involves the study of one of the largest environmental catastrophes that occur year after year, such as the forest fires that have left their enormous consequences after its spread in our environment. The investigation about its conduct and current methods used for monitoring this type of disaster, have shown a percentage of inefficiency timely way to detect signs of fire subsequently spread by way of large-scale forest fires. Then arises the need to design a system for monitoring forest fires based on ZigBee technology, whose characteristics allowed us to develop a wireless network (WSN) self-organizing sensors, which ensured the communication between all your devices on an intelligent topology and low power consumption. The network implementation allowed us to collect and census information about the ambient temperature, relative humidity and concentrations of carbon dioxide in a simulated forest fire. All information is stored in the database and then be displayed in a graphical interface with the purpose of allow the user to observe the variation of these environmental conditions and according to its conduct to deduce the origin of a forest fire. Finally through some tests with the implemented system detect the presence of fire focus immediately when the ambient temperature begins to rise, the relative humidity decreases and carbon dioxide concentrations exceded significantly its average value in normal conditions.

KEYWORDS:

- **FOREST FIRES**
- **ZIGBEE TECHNOLOGY**
- **WIRELESS SENSOR NETWORK**
- **ENVIRONMENTAL CONDITIONS**
- **DATABASE**

GLOSARIO

A

Ambigüedad Posibilidad de que algo pueda entenderse de varios modos o de que admita distintas interpretaciones.

AODV Ad hoc On Demand Distance Vector, algoritmo de enrutamiento diseñado para redes móviles inalámbricas.

ACK Acknowledgement, acuse de recibo.

B

Bit Unidad mínima de información, que puede tener solo dos valores (cero o uno).

Beacon Señal guía que sincroniza los dispositivos añadidos a una red.

BPSK Modulación por desplazamiento de Fase Binaria

Buffer Instrumento digital reservada para el almacenamiento temporal de información digital

C

CSMA/CA Acceso múltiple por detección de portadora evitando colisiones.

Combustión Reacción química entre gases.

CO₂ Dióxido de carbono, compuesto por dos átomos de oxígeno y una de carbono.

D

Delivery Es la operación de entregar un servicio adquirido.

DSSS Espectro Ensanchado por Secuencia Directa

Dbm Unidad de medida utilizada en las telecomunicaciones para expresar la potencia absoluta mediante una relación logarítmica en base a 1mW

E

Estación Base Instalación fija de radio para la comunicación bidireccional.

G

Gateway Dispositivo dedicado a intercomunicar sistemas con diferentes protocolos de comunicación.

H

Higrotermógrafo Instrumento que mide, y registra las variaciones de la humedad relativa y la temperatura ambiente.

I

ISM Bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética.

Interfaz Zona de comunicación o acción de un sistema sobre otro.

IEEE Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos

M

Mesh Término que refiere a una topología inteligente de red móvil.

S

Silvicultura Técnicas que se aplican a las masas forestales para obtener de ellas una producción continua y sostenible de bienes y servicios demandados por la sociedad.

R

RF Radio Frecuencia

Router Enrutador de información a través de una red

T

Turbulencia Velocidad del viento.

Topología La forma en que está diseñada la red, sea en el plano físico o lógico

TinyOS Lenguaje de programación desarrollado para una red WSN

U

Ubicuo Que está presente en todas partes al mismo tiempo.

W

WSN Redes de Sensores Inalámbricos

Z

Zigbee Estándar de comunicaciones inalámbricas de bajo costo.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La humanidad, a lo largo de su historia, ha utilizado el fuego para las diferentes labores cotidianas, con su beneficio indudable; aunque algunas veces esta herramienta ha sido utilizada con tan poca prudencia que en la actualidad es difícil de concebir la existencia de masas vegetales que no hayan sido alteradas por su acción. En Ecuador, el 7.34% de incendios forestales que se producen cada año le corresponde a la provincia de Pichincha, siendo esta una de las principales causas de deterioro ambiental que influyen significativamente en la alteración y degradación de la vida silvestre [1].

Si bien las causas inmediatas que dan lugar a incendios forestales pueden ser muy variadas, todas se dan bajo las mismas condiciones, esto es el dominio de grandes masas de vegetación en concurrencia con periodos más o menos prolongados de sequía; por ende el calor solar provoca deshidratación en las plantas que recuperan el agua perdida del sustrato. No obstante, cuando la humedad del terreno desciende a un nivel inferior al 30% las plantas son incapaces de obtener agua del suelo, con lo que se van secando poco a poco. Este proceso provoca la emisión a la atmósfera de *etileno*, un compuesto químico presente en la vegetación y altamente combustible. Tiene lugar entonces un doble fenómeno: tanto las plantas como el aire que las rodea se vuelven fácilmente inflamables, con lo que el riesgo de incendio se multiplica; y si a estas condiciones se suma la existencia de períodos de

vientos fuertes o moderados, la posibilidad de que una simple chispa provoque un incendio se vuelve significativa [2].

Tomando consideración a este ámbito, multinacionales tecnológicas como el GMV (Grupo Tecnológico Español), lidera un consorcio europeo encargado de contribuir a la prevención de incendios forestales mediante el análisis de las teorías y prácticas de prevención más relevantes que permitirán identificar los factores y obstáculos que reducen la eficacia de las medidas de prevención vigentes. Entonces surge una recomendación óptima mediante la implementación de una red de sensores inalámbricos que nos permita obtener mediciones y sacar las muestras necesarias para comprender las interrelaciones dinámicas existentes en sistemas naturales [3]. Las redes de sensores permiten reducir el tiempo de respuesta ante situaciones imprevistas a través de la observación en tiempo real y constante del ambiente controlado [4].

El crecimiento de esta tecnología inalámbrica se ha visto en un desarrollo constante durante los últimos años y ha logrado adentrarse exitosamente en el campo de la llamada "Inteligencia Ambiental" cuyo propósito básico es el dotar a objetos de capacidades de adquisición de información del entorno en tiempo real, procesamiento y comunicación a largas distancias, de tal manera que se pueda ofrecer múltiples servicios a través de este sistema [5].

Los objetivos de una red de monitoreo ambiental pueden ser muy diversos y dependen exclusivamente de las aplicaciones de la misma. En nuestro país por ejemplo, la gestión de zonas forestales involucraría ciertas actividades, como monitorización de áreas propensas a incendios, medición de variables físicas y químicas del medioambiente, así como también un seguimiento a información actualizada en lo referente a cambios climáticos, contaminación del medio, actos inconscientes, etc. [6].

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La provincia de Pichincha se encuentra en una zona con alto riesgo de incendios forestales y por ende puede generar una gran cantidad de desastres, induciendo a un peligro eminente. Cuando el grado de peligrosidad se relaciona con los niveles de vulnerabilidad sus consecuencias se reflejan en un territorio susceptible y con diferentes grados de exposición a un potencial desastre. Desde 1997 en los cantones de Pichincha centenares de incendios forestales han sido registrados. Ello se debe a que la mayoría de estos incendios que ocurren en el período sin lluvias en la sierra (junio a septiembre) no son reportados y si llegan a serlo se los detecta tardíamente posiblemente debido a un sistema de monitoreo retardado o poco confiable empleado por parte de las entidades correspondientes [7]. Todas estas experiencias suscitadas han demostrado la falta de un método previsorio rápido y eficaz frente a este tipo de fenómeno; aún cuando se han tomado grandes medidas al respecto todavía continúan causando extensas pérdidas de bienes, riesgo de vida, y recursos cada año, por lo cual una detección temprana resulta una solución óptima para la prevención de incendios en áreas forestales [8].

La difusión de cientos, a miles de sensores inalámbricos en el área determinada, resulta ser una propuesta eficaz para la detección y aviso de este tipo de incendios. Su pequeño tamaño, bajo costo y la eficiente tecnología inalámbrica que poseen permiten desplegar un amplio rango de vigilancia sensorial sobre ambientes hostiles como es el caso de áreas forestales, con la ventaja de una monitorización del medio en tiempo real; lo cual es imprescindible para la adquisición de datos, análisis inmediato de resultados y toma oportuna de medidas preventivas [9].

1.3 ALCANCE

Durante un periodo aproximado de seis meses, el proyecto propuesto contempla investigar el estado del arte sobre Incendios Forestales, teniendo en cuenta trabajos e investigaciones anteriores. A partir de esto se estudiará el comportamiento del fenómeno considerando sus características más sobresalientes, que nos ayudarán a visualizar un método efectivo para la monitorización de zonas forestales y una detección temprana en caso de incendio.

A través de un marco conceptual y teórico se determinará el funcionamiento del estándar IEEE 802.15.4 como base para el diseño de una red de sensores inalámbricos para monitorear y detectar la presencia de un incendio forestal, considerando aspectos fundamentales como parámetros de la red, equipos a utilizarse, herramientas de trabajo, normas de seguridad y limitaciones del área de prueba.

En la etapa de la implementación se recreará un escenario similar a un área forestal en un espacio verde de las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El lugar cuenta con todos los permisos y requisitos necesarios asignados por la Unidad de Desarrollo Físico de la institución. Posteriormente se analizará los resultados y experiencias suscitadas durante el desarrollo del proyecto para determinar si el sistema implementado cumple o no con las expectativas propuestas.

Al final se puntualizarán conclusiones y recomendaciones con el fin de generar propuestas de mejoramiento para investigaciones futuras, esperando con esto plantear la base de estudio en el país para posteriores implementaciones en ambientes reales y de mayor extensión.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e Implementar un prototipo de sistema de monitorización y detección de incendios para prevenir pérdidas de Áreas Forestales, mediante una red de Sensores Inalámbricos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el estado del arte sobre Incendios Forestales y los sistemas de monitoreo empleados actualmente para la detección de estos eventos.
- Diseñar un prototipo red inalámbrica (WSN) bajo el Estándar IEEE.802.15.4 que me permita censar factores medioambientales para detectar de manera temprana Incendios Forestales.
- Implementar una red de Monitoreo Forestal eficiente, flexible y de bajo consumo.
- Analizar el desempeño de la Red de Monitoreo y analizar su viabilidad para implementaciones en ambientes reales.

CAPITULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 INCENDIOS FORESTALES

El fuego es un factor natural, que ha condicionado la existencia y distribución de los bosques en el transcurso de miles de años. Es la herramienta que el hombre ha venido utilizando para numerosas labores agrícolas, ganaderas o forestales. Cuando se produce el fuego que no es controlado por el hombre tiene lugar lo que se entiende por incendio y en el caso de que este fuego no controlado, afecte a la vegetación que cubre los terrenos forestales se origina un incendio forestal. Si encuentra condiciones apropiadas para su expansión puede recorrer extensas superficies produciendo graves daños a la vegetación, fauna y suelo, causando importantes pérdidas ecológicas, económicas y sociales [19].

2.2 COMPONENTES DEL INCENDIO

El fenómeno del fuego se origina cuando el oxígeno del aire se mezcla con cualquier material combustible que pasa por un proceso de combustión, produciéndose el desprendimiento de gases, la emisión de calor, luz y con frecuencia la aparición de llamas. El fuego se inicia por la aportación de una fuente intensa de calor al combustible, en presencia del oxígeno, hasta que alcanza el punto de ignición y comienza a arder. Una vez en marcha el proceso, el calor generado puede hacer que el fuego se mantenga, por sí mismo, mientras disponga de combustible y oxígeno o hasta que se proceda a su extinción [11].

2.3 PROPAGACIÓN DE LOS INCENDIOS

La propagación del fuego tiene lugar desde un foco inicial, por medio de la transmisión del calor que se emite en la combustión, a los combustibles más o menos próximos que al calentarse pueden igualmente arder, y así sucesivamente. Existen tres formas de transmisión del calor y por tanto de propagación del fuego [11]:

2.3.1 Convección

Es la transferencia de calor originada por corrientes ascendentes de aire caliente conocida como efecto chimenea. Este fenómeno es de gran importancia en el desarrollo de los incendios forestales debido a la rapidez de su avance y a su paso del fuego del suelo hacia las copas de los árboles [11].

2.3.2 Radiación

En la radiación el calor pasa a través del aire sin que exista movimiento del mismo. Sólo tiene lugar a cortas distancias; por ello, en los incendios forestales la propagación por radiación afecta únicamente a los combustibles que están próximos a los que están ardiendo [11].

2.3.3 Conducción

En este caso el calor se transmite en el interior de un cuerpo sin que haya desplazamiento de las moléculas que lo componen. Esta forma de transmisión tendrá lugar cuando exista contacto entre plantas y/o materiales leñosos (raíces, troncos, ramas, etc.) que componen la vegetación.

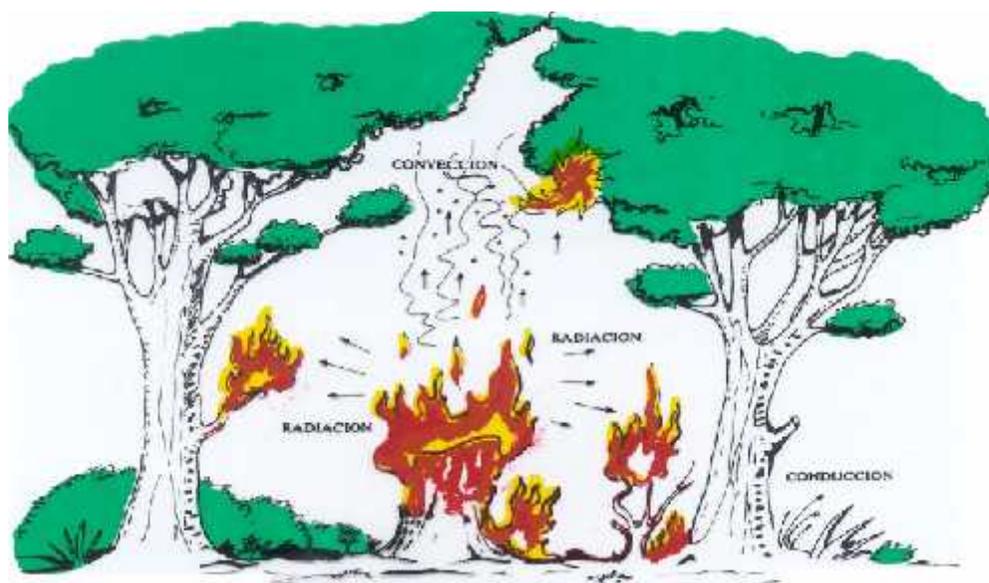


Figura. 2.1. Formas de Propagación del Fuego

2.4 TIPOS DE INCENDIOS FORESTALES

Según el estrato o piso del monte por el que se propaga el fuego se distinguen tres tipos de incendios:

2.4.1 Incendios de superficie

Se extienden superficialmente sobre el terreno, quemando la vegetación herbácea, matorrales, los restos y despojos vegetales (leñas muertas, hojarasca, etc.), sin apenas afectar al arbolado existente. Dado las características de estos combustibles, que arden con facilidad, los incendios de superficie son los más frecuentes y suelen ser el origen de los otros tipos [8].

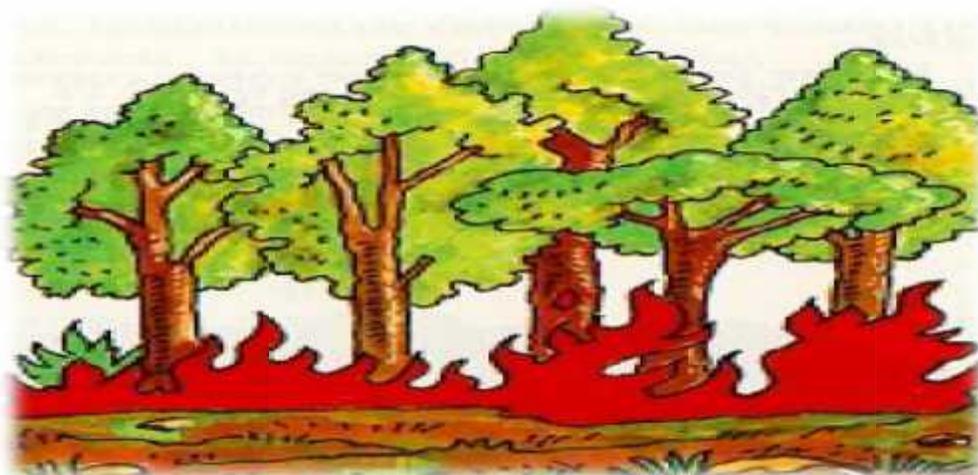


Figura. 2.2. Incendio de superficie

2.4.2 Incendios de copas

Se propagan a través de las copas de los árboles y son los que avanzan más rápido debido a que a esa altura el viento sopla con más fuerza que a nivel del suelo. Generalmente afectan a las masas arboladas y presentan mayor dificultad para su extinción debido su propagación por las copas [8].



Figura. 2.3. Incendio de Copas

2.4.3 Incendios de subsuelo

Avanzan quemando la materia orgánica seca y las raíces existentes debajo del suelo. Son fuegos lentos de propagación, sin llamas y con escaso desprendimiento de humo; su localización es difícil y suelen durar mucho tiempo al no ser fáciles de combatir. En general, se producen en contadas ocasiones [8].



Figura. 2.4. Incendios de Subsuelo

No siempre estos tres tipos de incendios se producirán de forma aislada, muchas veces se tendrá una combinación de ellos, en especial, los de superficie y copas que se propagan simultáneamente, aunque con distinta velocidad.

2.5 COMPORTAMIENTO DEL FUEGO

Los factores que influyen en el comportamiento del fuego son la topografía, el tiempo atmosférico y el combustible. El comportamiento del efecto de estos factores podría definir acertadamente una estrategia de combate más eficaz y segura.

2.5.1 La Topografía

Es el conjunto de particularidades que tiene un terreno. Estos factores topográficos afectan de manera significativa el comportamiento del fuego, entre los más significativos tenemos la pendiente del terreno, la exposición a la luz solar y la configuración de del terreno [12].

2.5.2 Tiempo Atmosférico

Es el factor que posee más influencia sobre el comportamiento de los incendios y a la vez el más variable debido a influencia de factores como la temperatura, la humedad relativa, el viento y precipitaciones en el lugar [12].

2.5.3 El Combustible

Por combustible forestal se entiende a cualquier material de origen vegetal vivo o muerto que puede entrar en combustión al aplicarle calor. Su consideración y evaluación es fundamental para la planificación del combate, ya que es el único factor sobre el cual podemos actuar, modificándolo o eliminándolo [12].

2.6 CAUSAS

La mayoría de los incendios forestales se producen en los meses de verano cuando las temperaturas alcanzan valores muy altos. Pero de manera general tenemos las siguientes causas de incendios forestales:

2.6.1 Negligencias

Gran parte de los incendios forestales se han producido por negligencia humana, ya sean estos por motivos relacionados con conflictos cinegéticos, quemas con finalidad agrícola ganadera, explotaciones forestales, hogueras mal encendidas

o incluso fumadores. Pero sobre todo uno de los mayores motivos para que sucedan este tipo de incendios ha sido el bajo conocimiento de la población, por esa escasa conciencia conservacionista que nosotros como sociedad no la tenemos clara [13].

2.6.2 Causas fortuitas

El factor climático ha dado lugar al origen de muchos incendios forestales, su predicción es casi imposible de diagnosticar y en conjunto con la alta inflamabilidad de las especies vegetales y mas la acumulación de estos combustibles en épocas de sequía, han facilitado la propagación y erradicación de gran cantidad de masas forestales. Dentro de este grupo se puede asumir que parte de estos incendios son provocados por rayos o también por reproducciones de incendios anteriores [13].

2.6.3 Intencionados

En este grupo tenemos los incendios provocados por pirómanos, por personas influenciadas políticamente, a veces por razones socioeconómicas y también por motivos forestales relacionados con el precio de la madera o por la recalificación de terrenos para urbanización [13].

2.6.4 Desconocidas

Son situaciones donde no se logró dar una explicación al origen del incendio, por circunstancias inéditas se dio inicio a la combustión de material vegetal desatando la quema descontrolada de áreas forestales [13].

2.7 MÉTODOS DE PREVENCIÓN TRADICIONALES

En lo referente a medidas de prevención adecuadas se ha difundido campañas de educación o cursos sobre prevención de incendios forestales; donde se detalla el estudio de la masa forestal, las causas probables, el tiempo climático, los lugares con

mayor riesgo y por supuesto su historial de vulnerabilidad durante el transcurso de los últimos años. Adicional a este proceso se fomenta la Silvicultura preventiva, realizando cambios o modificaciones en la estructura de la vegetación. Todo ello comprende limpieza, podas y eliminación de material combustible, así como la planificación de pastoreos controlados, delimitación de áreas cortafuegos y la programación de quemas controladas. Pero si el riesgo de incendio es aún mayor se ha optado por medidas más radicales como la inserción de un Sistema de Defensa contra Incendios, que estaría integrado por los siguientes componentes [14]:

- Inventario de puntos de agua utilizables en caso de incendios,
- Puntos estratégicos de parqueo de vehículos todoterreno, motobombas, extintores y herramientas.
- Bases Aéreas para helicópteros y avionetas.
- Organización de mapas de zonas forestales
- Personal técnico, guardas forestales o civiles capacitados.
- Red de Monitoreo y Vigilancia

Como medida de prevención también se puede hacer uso de la propaganda en época de altos índices de riesgo, haciendo notar las sanciones que están vigentes para quienes incumplan la ley tras haber atentado con la naturaleza.

2.8 REDES INALÁMBRICAS ZIGBEE

2.8.1 Origen

En 1998 surgió la idea del diseño de redes inalámbricas específicamente para tareas de automatización de bajo costo y en grandes volúmenes debido a que WIFI y Bluetooth no eran consideradas alternativas tan viables para este tipo de tareas. Entonces en el año 2000 la IEEE empieza su proyecto IEEE 802.15.4 de Redes Inalámbricas de Area Personal (WPAN), y para finales del año 2004 se

aprobaron las primeras especificaciones creadas por el grupo de desarrollo *ZigBee Alliance*, con la finalidad de plantear los lineamientos para desarrollar redes de bajo costo, que sean sencillas de implementar y que aprovechen de manera eficiente la vida útil de las baterías que emplean sus nodos. El desarrollo de la tecnología ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4, el cual sirve de apoyo sobre todo para las capas inferiores de su pila de protocolos, mientras que de las capas superiores se encargan las recomendaciones publicadas por *ZigBee Alliance*, siendo las últimas aprobadas en el año 2006 [15].

2.8.2 Relación Zigbee / IEEE802.15.4

La relación que existe entre ZigBee y el estándar IEEE802.15.4 está basada en la arquitectura definida en capas según el modelo OSI. Cada capa se encarga de ofrecer servicios a las capas superiores. Estas capas muestran las características que hacen a la tecnología ZigBee muy llamativa y de bajo consumo, tanto energético como económico. El estándar IEEE802.15.4 solo contempla las capas PHY (Capa Física) y MAC (Control de Acceso al Medio); mientras que la capa NWK (Capa de Red) y la APS (Capa de Aplicación) han sido establecidas por la Alianza ZigBee. En la figura x.x. podemos apreciar las distintas capas de la tecnología ZigBee en relación al estándar IEEE 802.15.4 [16].

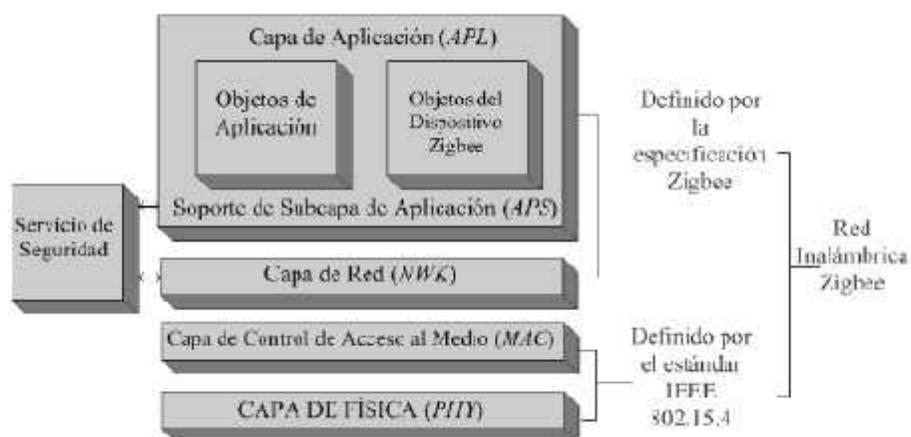


Figura. 2.5. Modelo de Referencia ZigBee y 802.15.4

2.8.3 IEEE802.15.4

El estándar tiene como objetivo principal la comunicación y la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes que requieren de un bajo consumo de energía. Su tasa de transmisión de datos va desde los 20 kbps hasta 250 kbps en radios de cobertura de entre 10 y 75 metros soportando bandas de radio de 2400-2483,5 MHz (utilizado en todo el mundo) empleando 16 canales. También es compatible en las bandas de 868-868,8 MHz (Europa) y 902-928 MHz (Norte América), hasta diez canales (2003) extendidos a treinta (2006) [16].

2.8.4 Zigbee Alliance

Es un conjunto estandarizado de soluciones para comunicaciones inalámbricas que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. Su diseño a cargo de ZigBee Alliance fue creado con el objetivo de desarrollar aplicaciones que requieren comunicaciones con un sistema a bajo costo, transmisión de pequeños paquetes de información, bajo consumo energético, seguro, fiable y que tengan facilidad de integrar y desintegrar componentes inalámbricos de acuerdo a los requerimientos de la red implementada [16].

2.8.5 Arquitectura Zigbee

Como se mencionó anteriormente, las capas inferiores de los dispositivos ZigBee están basadas en las especificaciones IEEE 802.15.4. Mientras que las capas superiores corresponden a las publicaciones realizadas por *ZigBee Alliance*.

2.8.5.1 Capa Física (*Physic Layer, PHY*)

La capa física fue diseñada debido a la necesidad de obtener principalmente una eficiencia energética de bajo costo. Esta capa se encarga de brindar servicios de transmisión de datos por aire gestionando las frecuencias de operación, potencias de transmisión y recepción, tasa de datos y modulación correspondiente a cada banda.

En este punto se hace referencia a la existencia de cuatro tipos de capas físicas y cuya elección dependen del usuario, basado en la ubicación geográfica de la red. Las capas físicas se diferencian principalmente por la frecuencia y modulación con la que trabajan. Según la publicación del año 2003, la banda de frecuencia de 868 – 868.6 MHz, que es usada en Europa posee un canal, permitiendo velocidades de transmisión de 20 Kbps Por otra parte, la banda de 915 - 928 MHz, que es usada en América del Norte posee 10 canales con espaciamiento de 2 MHz, permite una velocidad de transmisión de 40 Kbps Dentro de la banda de 2.4 – 2.4835 GHz, que es usada en el resto del mundo, cuenta con 16 canales con espaciamiento entre ellos de 5 MHz, permitiendo manejar velocidades de transmisión de 250 Kbps [10].

Tabla. 2.1. Distribución de Frecuencias de trabajo para IEEE 802.15.4

| COBERTURA | BANDAS DE FRECUENCIA | CANALES | VELOCIDAD DE DATOS | MODULACIÓN |
|------------------|----------------------|---------|--------------------|--------------|
| TODOS LOS PAISES | 2.4 - 2.4835 GHZ | 16 | 250 Kbps | O-QPSK |
| AMÉRICA | 915 - 928 MHz | 10 | 40 Kbps | O-QPSK ,BPSK |
| EUROPA | 868 - 868.6 MHz | 1 | 20 Kbps | BPSK |

2.8.5.2 Capa de Enlace de Datos (*Data Link Layer, DDL*)

Esta capa se encuentra dividida en dos subcapas; siendo una de ellas la de Control de Enlace Lógico (*Logical Link Control, LLC*), que es común para otros tipos de tecnologías de acceso como Ethernet, Bluetooth, Wi-Fi, WiMax y ZigBee. La otra subcapa es la de Control de Acceso al Medio (*Medium Access Control, MAC*) que depende del tipo de hardware que se encuentre en la capa física y sirve de enlace entre la capa física y la subcapa LLC [10].

2.8.5.3 Capa de Red (*Network Layer, NWK*)

La capa de red define los métodos necesarios para iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, facilitar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrados y autenticados. En esta capa es donde se despliegan las distintas topologías de red (punto-punto, estrella, malla) [10].

2.8.5.4 Capa de Aplicación (*Application Layer, APL*)

La capa de aplicación se encuentra en el nivel conceptual más alto dentro de la Arquitectura Zigbee, de la cual se encargan los fabricantes de cada dispositivo. En esta capa se encuentran los Zigbee Device Objects (ZDO) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, la subcapa APS y los Objetos de Aplicación definidos por cada fabricante. Además de las capas mencionadas se integran otro par de módulos: módulo de Seguridad, quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo Zigbee, encargado de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota [10].

2.9 REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN)

Estas redes son de tipo autónomo, formadas por pequeños nodos inteligentes, distribuidos de forma espacial donde ellos mismos se auto-organizan y gestionan la red. Utilizan sensores para monitorear condiciones físicas y ambientales (temperatura, presión, humedad, datos químicos, etc.), para luego procesar la información y hacerla circular convenientemente por la red. Este modelo supone una visión particular de la computación *ubicua* que requiere el desarrollo de dispositivos y tecnologías específicas, las cuales deben suponer una integración en el entorno que monitorizan pero sin alterarlo [15].

2.9.1 Características de una WSN

Una característica única de estas redes es el tipo de información que genera y la forma en que lo hace. Normalmente se consideran dos casos: bien puede ser que la red informa de un suceso ocurrido o que el usuario interroga anticipadamente sobre un hecho. En este último caso, lo habitual en una WSN es que el interés del usuario no se centre en la respuesta concreta de un nodo en cuestión, sino sobre el estado de cierto parámetro en un área determinada (por ejemplo, la zona bajo estudio en la que la temperatura supera un cierto umbral). Por lo general las WSN están formadas por un alto número de nodos, que se encuentran distribuidos en el entorno donde se produce el fenómeno que se desea monitorizar. Además, se contempla que los nodos sean estáticos o con baja, media o alta movilidad, según la aplicación en concreto; por lo tanto se requieren técnicas típicas de redes ad-hoc, es decir, que deben ser capaces de encaminar la información desde un origen a un destino sin confiar en una infraestructura externa para el descubrimiento y conformación de la red. Sin embargo, las WSN no son exactamente redes ad-hoc por lo que dichas técnicas pueden ser un punto de partida pero es necesario avanzar un paso más, para dar respuesta a su problemática particular [15].

2.9.2 Elementos de una WSN

En una WSN podemos distinguir los distintos elementos que forman parte de la red y los identificamos en la figura. 2.6 [17]:

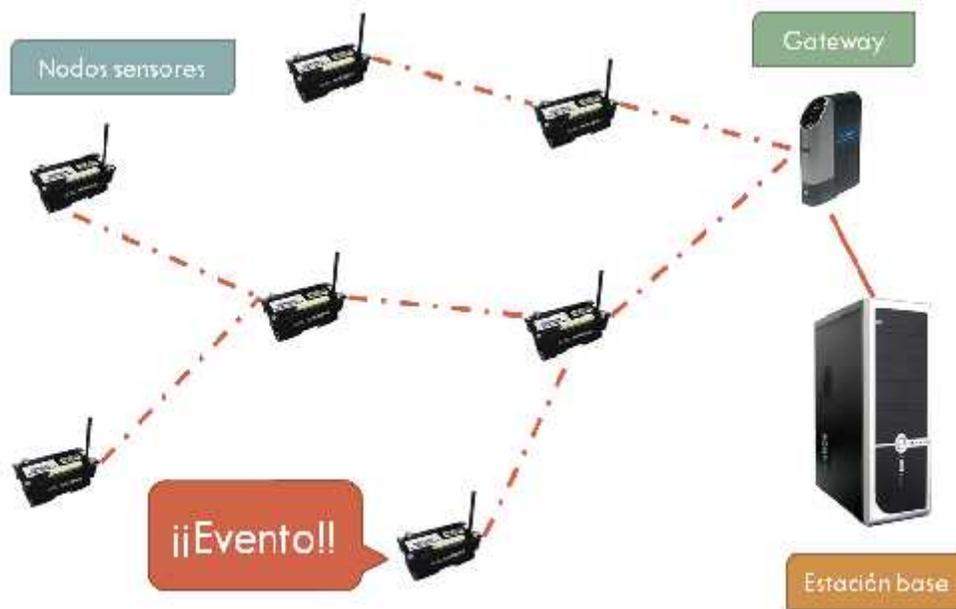


Figura. 2.6. Elementos de la WSN

- **Sensores:** Toman del medio la información y la convierten en señales eléctricas.
- **Nodos (Motas):** Toman los datos del sensor y envían la información a la estación base.
- **Gateway:** Elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (TCP/IP).
- **Estación Base:** Recolector de datos basado en un ordenador común o sistema embebido.

2.10 ESTRUCTURA DE UN NODO SENSOR

La estructura de un nodo es completamente dependiente del propósito del despliegue o de la aplicación requerida, pero generalmente están compuestos por los siguientes componentes indica la figura. 2.7. [17]:

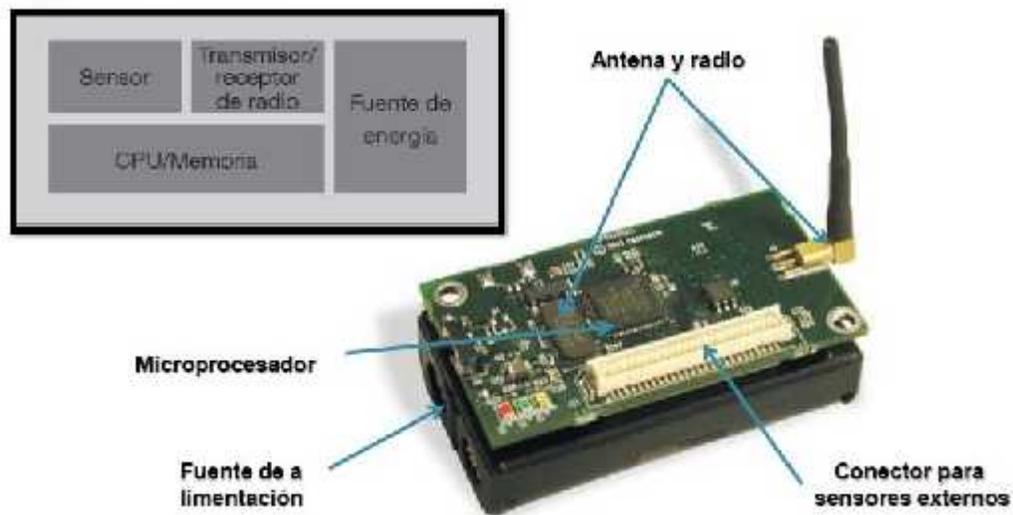


Figura. 2.7. Estructura de un Nodo Sensor

2.10.1 Unidad de proceso (CPU)

Es la unidad de cómputo que provee inteligencia al nodo sensor. Por su coste, se suelen emplear microcontroladores. Está encargado de gestionar todas las actividades del nodo entre las que destacan la captura de datos y su procesamiento, labores críticas de comunicación con otros nodos y la gestión eficiente de la energía disponible [17].

2.10.2 Memoria

Para realizar las funciones anteriormente mencionadas, la unidad de proceso se apoya en el módulo de memoria que dispone de almacenamiento en forma de acceso aleatorio y memorias de sólo lectura tanto para almacenamiento de información y para la ejecución de programas. Estas cantidades de memoria son limitadas especialmente por consideraciones económicas [17].

2.10.3 Módulo sensor

Se trata de un sensor o un grupo de ellos, conectados con la unidad de proceso. Miden parámetros físicos de su entorno (temperatura, presión, intensidad lumínica, humedad, movimiento, etc.) [17].

2.10.4 Módulo de comunicaciones inalámbricas (Transceiver)

Es un circuito RF que ejecuta el proceso de transmisión y recepción a través del cual el nodo interactúa y se comunica con sus nodos vecinos. Debido a las restricciones son dispositivos de corto alcance (metros) y baja velocidad (varios Kbps). Las radiocomunicaciones en los WSN son las operaciones de mayor consumo energético, y por lo tanto, deben incluir modos de trabajo de adormecimiento (sleep-mode) para una mejor eficiencia energética y modo de despertarse o activación (wake-up) [17].

2.10.5 Sistema de alimentación

La unidad de abastecimiento de energía que usualmente es una batería que administra un voltaje de salida para alimentar al resto de componentes en el sistema. Cada nodo debe estar equipado con su propia fuente de alimentación y es el recurso que limita la vida útil del dispositivo, siendo una de las principales restricciones y requisitos de diseño. Normalmente son baterías autónomas, aunque también se contempla el uso de placas solares, energizados vía cable o lo que sería más factible, utilizando técnicas de alimentación con energía renovable [17].

2.11 TIPOS DE NODOS

Las Redes Zigbee definen tres tipos de dispositivos según el papel que desempeñan en la red:

2.11.1 Coordinador Zigbee (Zigbee coordinator, ZC)

Es el dispositivo más completo, encargado de administrar e iniciar la formación de la red inalámbrica, escoge un canal libre y lo gestiona, selecciona un identificador de red (PAN ID) y posteriormente puede actuar como router. Por otro lado, el ZC es el encargado de controlar el proceso de incorporación de nuevos dispositivos, tomando en cuenta los parámetros iniciales de configuración de la red y manejando las peticiones de los nuevos dispositivos. Mantiene una lista de los dispositivos incorporados y brinda soporte a dispositivos libres para que puedan asociarse o reincorporarse a la red. Como controlador de las incorporaciones de dispositivos, también puede eliminarlos o desasociarlos, previa petición de los mismos [15].

2.11.2 Router ZigBee (RZ)

Una vez que el router ha sido validado y asociado a la red, será el encargado de permitir que otros dispositivos se incorporen a dicha red, mediante los parámetros de configuración que posee. Sin embargo, este dispositivo es opcional ya que el coordinador de red puede cumplir con la función de enrutar paquetes. Cuando el router recibe una petición de un nuevo nodo para unirse a la red, se encarga de comunicarlo al coordinador y si la seguridad de red está habilitada, dicha petición deberá pasar por el centro de validación. Una vez que se permita su asociación el router debe indicarle al nuevo nodo la configuración de la red. El router mantiene una lista de los nodos asociados, con la finalidad de enrutar paquetes [15].

2.11.3 Dispositivo Final – ZigBee End Device (ZED)

Estos dispositivos poseen la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo router o coordinador pero no pueden enrutar información [15].

2.12 TOPOLOGÍAS DE RED

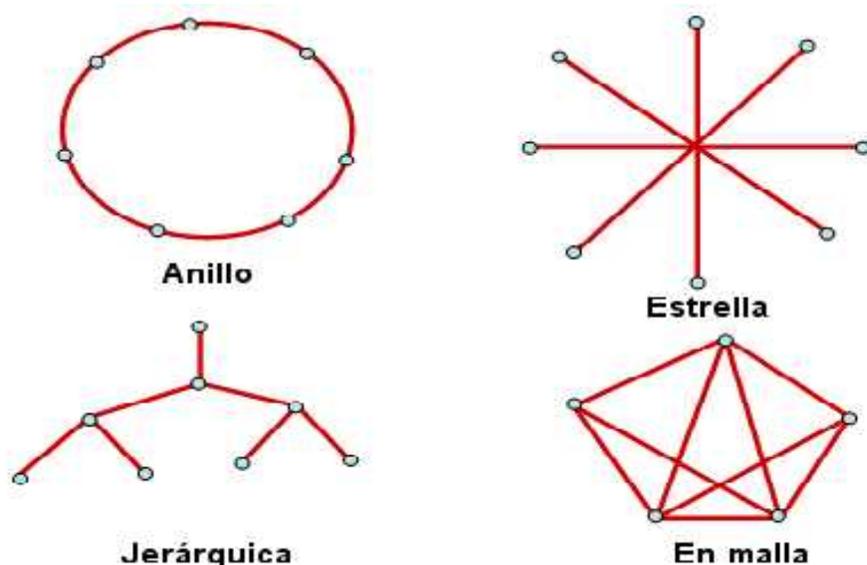


Figura. 2.8. Topologías de Red

2.12.1 Topología Estrella

Se configura con un único coordinador de red y todos los dispositivos de funciones reducidas (RFD) se comunican directamente con él. El coordinador será el encargado de la inicializar y comunicar a todos los demás dispositivos de la red, esto gracias a que mantiene tablas de relaciones o direccionamiento directo. Cada red en estrella trabaja independientemente de cualquier otra que se encuentre en su rango de cobertura, debido a que al iniciarse la configuración de la red, el coordinador escoge un PAN ID que no esté siendo usado por otro coordinador próximo [18].

2.12.2 Topología Árbol

Donde el coordinador es responsable de inicializar y configurar algunos parámetros de red, pero la red puede ser extendida usando enrutadores, los mismos que envían datos y mensajes de control usando una estrategia jerárquica [18].

2.12.3 Topología Punto a Punto

Se encuentra conformado igualmente por un solo coordinador de red, pero con la diferencia que cada dispositivo final es un FFD que puede establecer enlaces punto a punto hacia los otros nodos, razón por lo cual pueden comunicarse entre todo ellos. Al inicio el coordinador será el encargado de formar la red y de enrutar los paquetes, pero conforme se establecen los nodos, estos serán capaces de realizar el encaminamiento de los datos a su destino, incluso mediante múltiples saltos [18].

2.12.4 Topología Malla

Es una extensión de la red punto a punto, con la diferencia que a cada FFD que conforma la red, se le agregan dispositivos finales RFD. De esta manera aparecen los llamados Router ZigBee que permitirán comunicar a los nodos entre sí. Este tipo de topología permite mantener una baja latencia y una alta confiabilidad; sin embargo, se requiere de dispositivos con mayor capacidad computacional para manejar datos y enrutamiento [18].

2.13 PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO

Un protocolo de enrutamiento es el encargado de determinar por cual ruta se enviarán los paquetes de un nodo hacia otro, basándose en un esquema de la topología de red que mantienen gracias a diferentes condiciones del enlace que analizan; como pueden ser el ancho de banda, el número de saltos, la calidad del enlace, etc. El protocolo de enrutamiento se encuentra configurado únicamente en dispositivos con capacidad de enrutamiento; es decir, dentro de las WPAN solo se encuentran establecidos en los FFD (*Full Function Device*), ya sea que actúen como coordinador de red o como router [10].

Entre los protocolos más eficientes a ser implementados en una Red WSN tenemos los siguientes:

2.13.1 Protocolo DSDV

El Protocolo DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol) utiliza una modificación del algoritmo de encaminamiento Vector Distancia utilizado en redes fijas, como por ejemplo en el protocolo RIP. En este algoritmo, los nodos vecinos intercambian periódicamente sus tablas de encaminamiento enteras para estimar a la que se encuentran los demás nodos no vecinos, sin embargo también se puede enviar actualizaciones cuando se detecta un evento, es decir puede existir un cambio de topología, la caída de un enlace, el ingreso o salida de un nodo, etc. DSDV proporciona un camino para cada destino y siempre elige el más corto basándose en el número de saltos hacia ese destino [10].

2.13.2 Protocolo AODV

El Protocolo AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector) utiliza un vector distancia cuya métrica se basa en el número de saltos, se activa únicamente cuando se requiere enviar paquetes, o sea bajo demanda. AODV no mantiene tablas de rutas permanentes, estas tienen un tiempo de vida muy corta (*Lifetime*) y se crean básicamente mediante procesos de peticiones y respuestas de rutas hacia los otros nodos. La ventaja de este protocolo es la de reparar daños en la red, como por ejemplo si un nodo vecino detecta que un enlace está roto, tratará de descubrir una nueva ruta hacia el nodo con el que perdió el enlace [10].

2.13.3 Protocolo DSR (Dynamic Source Routing)

El Protocolo DSR (Dynamic Source Routing) es una fuente dinámica orientado a redes de gran cantidad de nodos (algunos cientos) móviles. Se fundamenta en el encaminamiento desde el origen, es decir, los paquetes de datos incluyen una cabecera de información con la información exacta de los nodos que debe atravesar. No requiere ningún tipo de mensajes periódicos (reactivo), disminuyendo así la sobrecarga con mensajes de control. Además, este protocolo trabaja bajo demanda y para optimizar completamente el ancho de banda, no realiza ningún tipo de actualización [10].

CAPITULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO

3.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El diseño de la red de monitoreo está compuesto de tres etapas con sus respectivos componentes [17].

3.1.1 Etapa de Red

Donde se encuentra la red formada por la nube de sensores.

3.1.2 Etapa de Servidor

Se encarga de la traducción y almacenamiento de información proveniente de la red inalámbrica y provee un puente entre los nodos sensores y los usuarios de la red.

3.1.3 Etapa de Usuario

Provee el software para visualizar los datos recolectados y la interfaz gráfica para administrar la red.

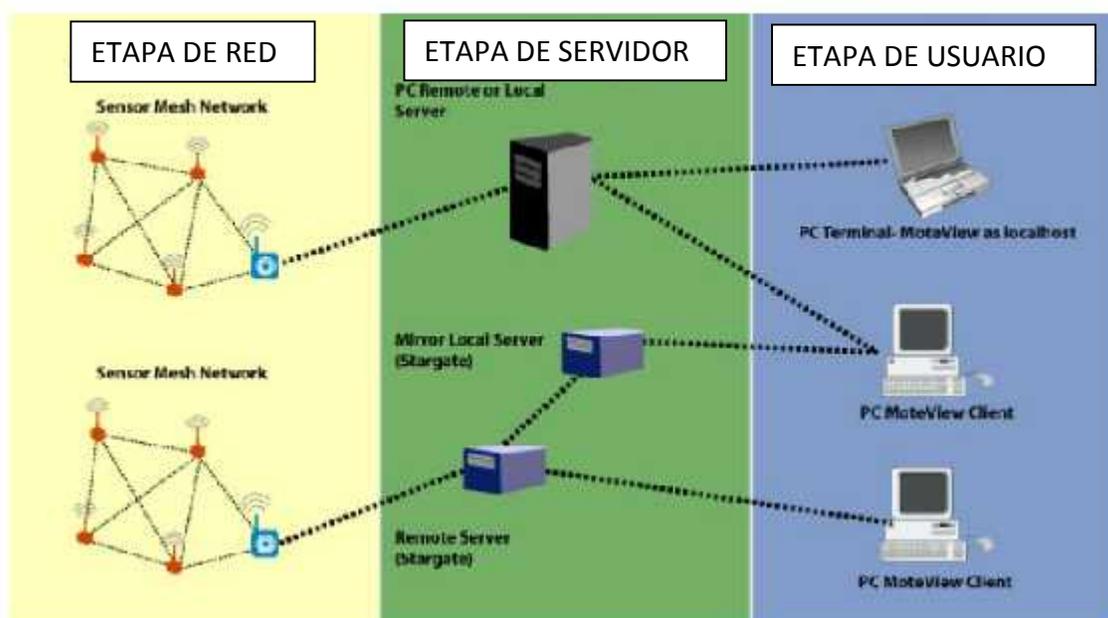


Figura. 3.1. Arquitectura del Sistema de Monitoreo

3.2 CONFIGURACIÓN DE LA RED

Para el diseño de la Red Inalámbrica de Sensores manipulamos los siguientes parámetros de configuración de los equipos de acuerdo al Estándar IEEE 802.15.4 sobre el cual han sido desarrollados.

3.2.1 Protocolo de Enrutamiento

Para la selección y uso de un protocolo de enrutamiento en la configuración de la red, se ha tomado en cuenta el más eficiente en base a los requerimientos del sistema de monitoreo, que me permita una comunicación multi-salto, donde los nodos no necesiten estar conectados directamente, y me facilite la entrega de mensajes a uno o mas destinos con nodos intermedios que se encargaran de enrutar la información. Estas características son cubiertas por el protocolo AODV, el cual se activa únicamente cuando se requiere enviar paquetes, o bajo demanda y tiene la ventaja de reparar daños en la red [10].

3.2.2 Topología de Red

Existen varias topologías que pueden ser usadas para implementar una aplicación de WSN como puede ser estrella, malla o una híbrida entre las dos, cada topología es apropiada bajo ciertas circunstancias y puede ser inapropiada para otras. Para la red que se diseñó se utilizó la topología Híbrida Malla-Estrella gracias a sus ventajas que presenta frente a las demás topologías. Este tipo de configuración busca combinar la simplicidad y bajo consumo de una topología en estrella con la posibilidad de cubrir mayor extensión y reorganizarse ante fallos de la topología en malla. La topología híbrida se sustenta en el protocolo AODV para facilitar el movimiento de los datos a través de múltiples nodos hasta encontrar su nodo destino teniendo en cuenta mas de un camino posible [17].

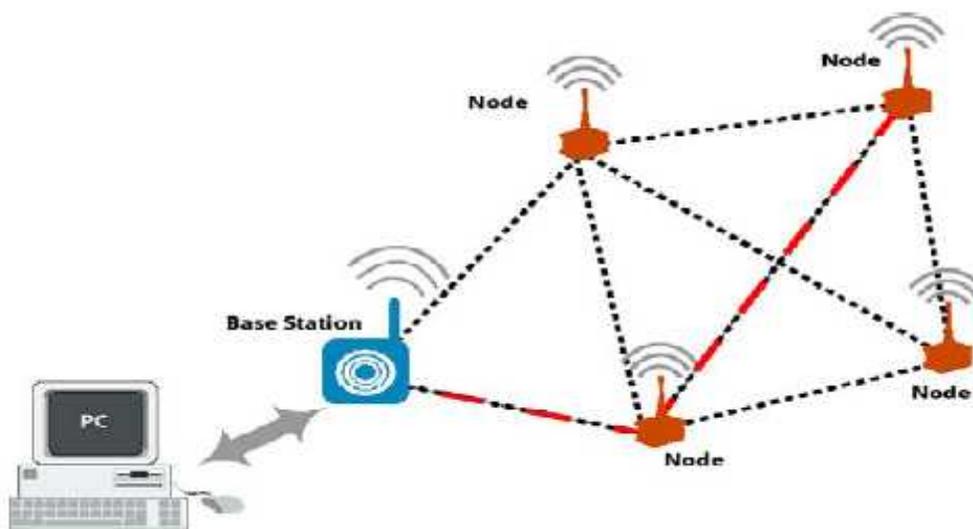


Figura. 3.2. Topología Híbrida (Malla-Estrella)

3.3 CONFIGURACIÓN DE LOS NODOS

Los nodos de la red diseñada se configurarán en base a los parámetros del estándar IEEE.802.15.4, seleccionando las mejores características para que puedan cumplir su función de monitorear y detectar un incendio forestal

3.3.1 Banda de Operación

La red utilizará la banda de 2.4 – 2.4835 GHz, que es usada en el resto del mundo, cuenta con 16 canales con espaciamiento entre ellos de 5 MHz, permitiendo manejar velocidades de transmisión de 250 Kbps utilizando la modulación O-QPSK. De los canales disponibles se utilizó el canal 15 para la configuración de la transmisión de los nodos. Este canal no se solapa con los canales disponibles para la tecnología WIFI, lo cual nos permite evitar todo tipo de interferencias con otros dispositivos que se encuentren operando bajo la misma banda de frecuencia [16].

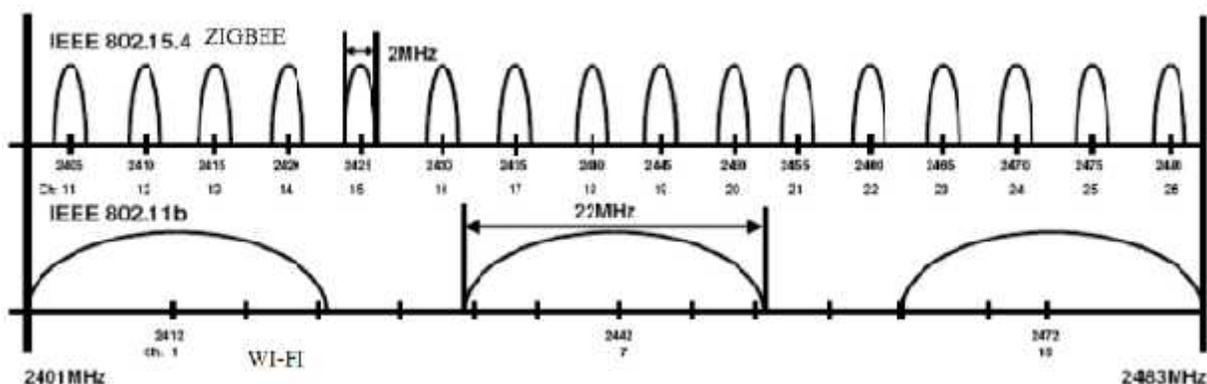


Figura. 3.3. Canales IEEE 802.15.4

3.3.2 Potencia de Transmisión

Se ha especificado para el diseño, la configuración de los nodos transmisores con una potencia de 1 mW (0 dbm), debido a que resulta más eficiente emitir ondas de radio a baja potencia que emitir ondas de RF de alta potencia para alcanzar grandes distancias [16]. Se espera que con esta potencia los dispositivos cubran el rango necesario para establecer el enlace adecuado con todos los nodos, dependiendo de los demás parámetros de la red y de la distancia de separación entre nodo y nodo.

3.3.5 Sistema de Alimentación

Uno de los requerimientos principales de la red es configurar el tiempo de funcionamiento de los nodos inalámbricos en base al tipo y la capacidad del sistema de alimentación que les vayamos a proveer; en nuestro caso están equipados por fuentes independientes de energía para cada nodo, donde utilizaremos 2 baterías AA de 1.5V para 2000 mA/hr incrustadas en un adaptador para suministrar energía a cada nodo [21].

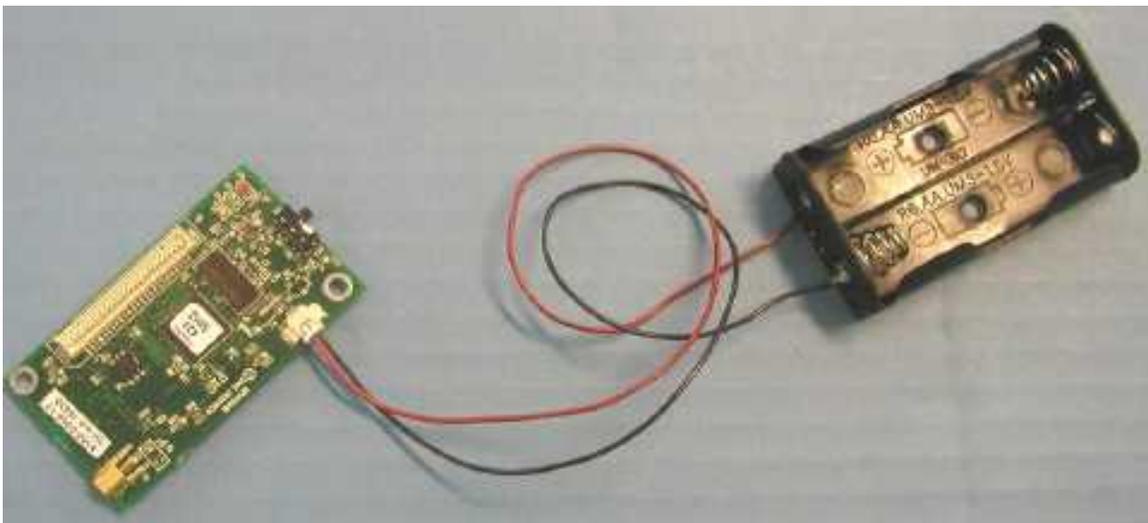


Figura. 3.5. Sistema de Alimentación de los Nodos

Adicional adaptamos a los nodos una fuente provisional de mayor capacidad para alimentar los dispositivos que vayamos a implementar para medir nuestras variables ambientales. Para esto utilizamos una batería seca recargable de 6V de 3700 mA/h.



Figura. 3.6. Batería Recargable de 6V

En vista que nuestros sensores trabajan comúnmente con una tensión de 5V, diseñamos un regulador de voltaje para adaptar la batería de 6V a estos dispositivos.

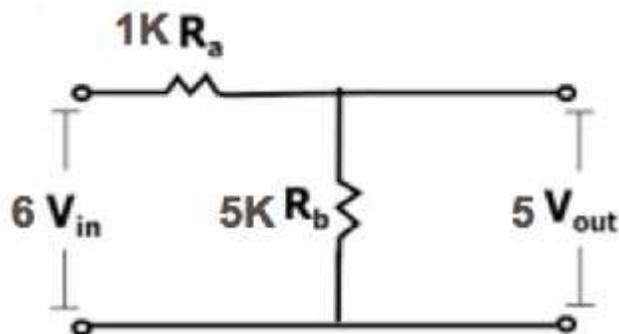


Figura. 3.7. Circuito Regulador de Voltaje

3.4 EQUIPOS DISPONIBLES

Para el diseño de la red nos guiaremos de los equipos disponibles en el laboratorio, que son equipos de la compañía MEMSIC, cuyas características se basan en el estándar IEEE.802.15.4 para comunicaciones inalámbricas de bajo consumo.

3.4.1 Características del Hardware

Los equipos MEMSIC conforman redes inalámbricas de corto alcance y utilizan un tipo de topología inteligente que les permite optimizar sus recursos energéticos. Las arquitecturas auto organizadas de estas redes permiten nuevas aplicaciones inalámbricas dispositivo a dispositivo y cuyos componentes son:

3.4.2 Nodos (IRIS M2110)

Los Nodos modelo IRIS M2110 son los componentes principales de la red, encargados de la detección, procesamiento de la señal, almacenamiento de la información, y de las comunicaciones inalámbricas bajo el abastecimiento de un sistema de alimentación autónomo, todo esto adjunto en un módulo. Para nuestros fines se encargaran de tomar los datos de los sensores a través de sus puertas de datos, y enviarán la información vía RF a la estación base [21].

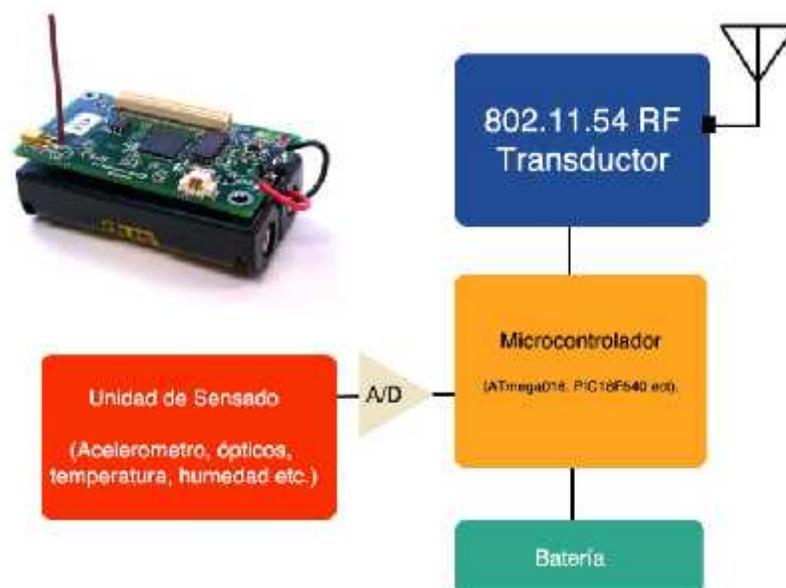


Figura. 3.8. Estructura de un Nodo IRIS M2110

3.4.3 Sensores

Los sensores que necesitamos y que tenemos disponibles para nuestro diseño, en base a los factores ambientales que vamos a medir son:

- **MDA300CA:** Esta unidad consiste de sensores incrustados de Temperatura y Humedad Relativa. Posee una tarjeta adquisición de datos diseñada con entradas de conversión análogo-digital, entradas digitales, contadores, relés para usos específicos y una entrada tipo hembra de 51 pines para su conexión directa con el nodo [22].



Figura. 3.9. Tarjeta MDA300CA

- **MQ-2:** Estos transductores se usan para transformar una forma de energía en otra, en nuestro caso transformará las concentraciones de un gas (dióxido de carbono), en señales de voltaje, que variarán dependiendo de las partes por millón del gas en el ambiente. Este dispositivo detecta la presencia de dióxido de carbono en concentraciones de 300 a 10.000 ppm [23].



Figura. 3.10. Sensor de gas MQ-2

- Circuito de acoplamiento del Sensor MQ-2:** Incorpora una sencilla interfaz de tensión analógica que únicamente requiere un pin de entrada analógica del micro controlador. Con la conexión de cinco voltios en los pines el sensor se mantiene lo suficientemente caliente para que funcione correctamente. Solo tiene que conectar 5V a cualquiera de los pines (A o B) para que el sensor emita tensión. La sensibilidad del detector se ajusta con una carga resistiva entre los pines de salida y tierra [23].

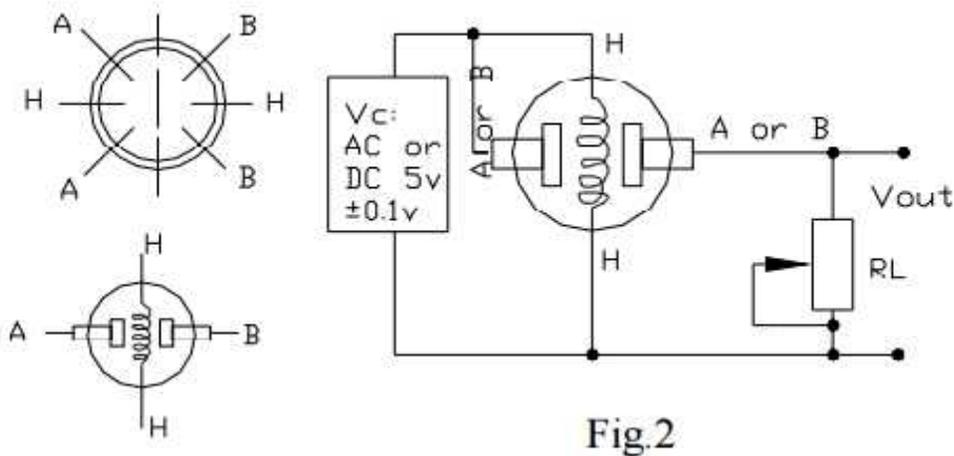


Figura. 3.11. Circuito de Acondicionamiento del Sensor MQ-2

3.4.4 Gateway (MIB520)

El Gateway MIB520 es el elemento para la interconexión entre la red de sensores vía interfaz de radio y el servidor de datos mediante comunicación USB. Se encarga de formar la red y administrar toda la información entrante y saliente [17].



Figura. 3.12. Gateway MIB520

3.4.5 Estación Base (XSERVE)

Este componente se encarga de almacenar toda la información enviada por la red de nodos sensores. Esta base de datos puede residir en la PC en el localhost, o en un servidor remoto. El tamaño de esta base de datos es limitado por la capacidad de almacenamiento en el sistema [17].



Figura. 3.13. Servidor de Datos (X-Serve)

3.4.6 Interfaz Gráfica de Usuario (MOTIEVIEW)

MoteView es el interfaz utilizado por el cliente final que permite entregar una solución punto a punto a través de todas las gradas de las redes de sensores inalámbricas. Esta interfaz exhibe la información de la red a los usuarios finales, revelando la red entera o los nodos individuales. Permite además, analizar la información de la red gráficamente o en formato textual. *MoteView* tiene la capacidad de lectura que permite la visión histórica del estado de la red y en un cierto plazo las lecturas de los sensores, y se basa en el registro de información almacenada en el XServe facilitando a los usuarios finales optimizar la disposición de la red y su configuración [17].

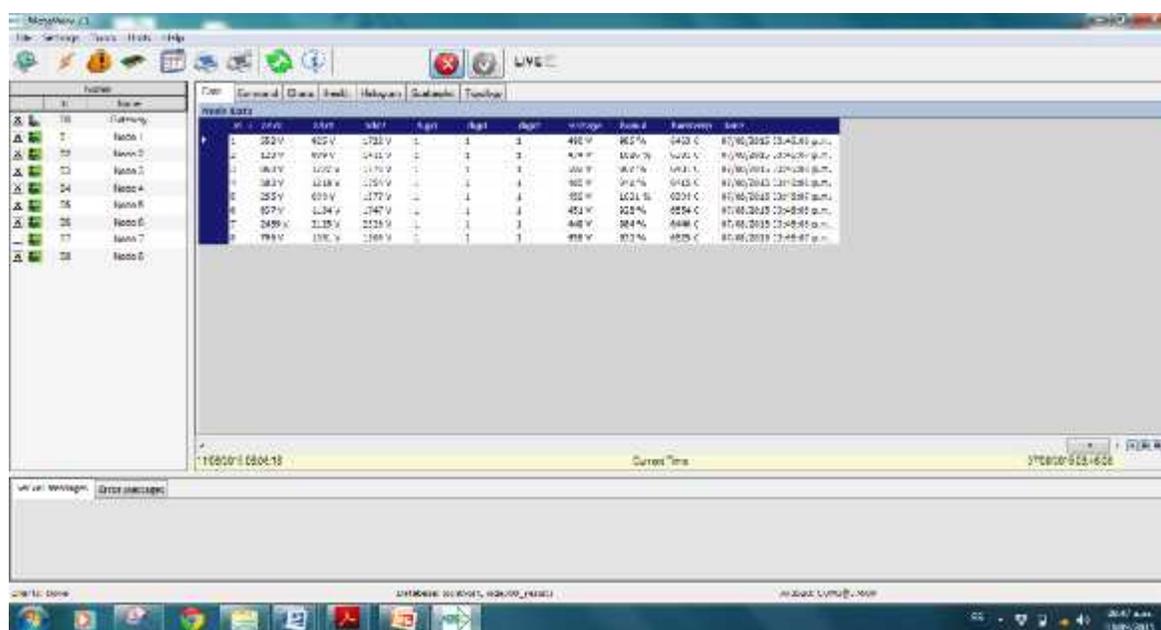


Figura. 3.14. Interfaz Gráfica de Usuario (Moteview)

3.5 FACTORES AMBIENTALES A MEDIRSE

Para el diseño de la red de monitoreo forestal se ha definido las variables medioambientales a ser medidas en un área de prueba y que nos sirven para detectar el momento cuando se esté iniciando un incendio forestal.

3.5.1 Temperatura Ambiental

Estudios meteorológicos nos dan a conocer que en un entorno de un incendio forestal, las temperaturas altas pueden precalentar los combustibles y acercarlos a su punto de ignición y por el contrario, las temperaturas bajas tienen el efecto opuesto [19].

3.5.2 Humedad Relativa

Consecuentemente el porcentaje de humedad relativa presente en la atmósfera influye en el aumento o la disminución de la humedad de los combustibles. Cuando la humedad relativa es baja, los combustibles finos pueden secarse más rápidamente o, si ya están secos, pueden seguir estándolo. Las condiciones de humedad relativa más alta inhiben la desecación de los combustibles finos y los humectan. Los combustibles secos arden con mayor facilidad, mientras los combustibles que absorben mucha humedad no pueden mantener encendido el fuego. Por esta razón los vigilantes de bosques deben monitorear las tendencias relacionadas con la temperatura y la humedad relativa para evaluar los posibles efectos en los combustibles. La combinación de las condiciones de temperatura y humedad relativa no solo aumenta la probabilidad de ignición, sino también apoyan a la propagación del fuego. La correlación diurna entre la temperatura y la humedad relativa se pueden observar con un *higrotermógrafo*, un instrumento que registra el cambio en los valores de temperatura y humedad que ocurren con el tiempo [19].

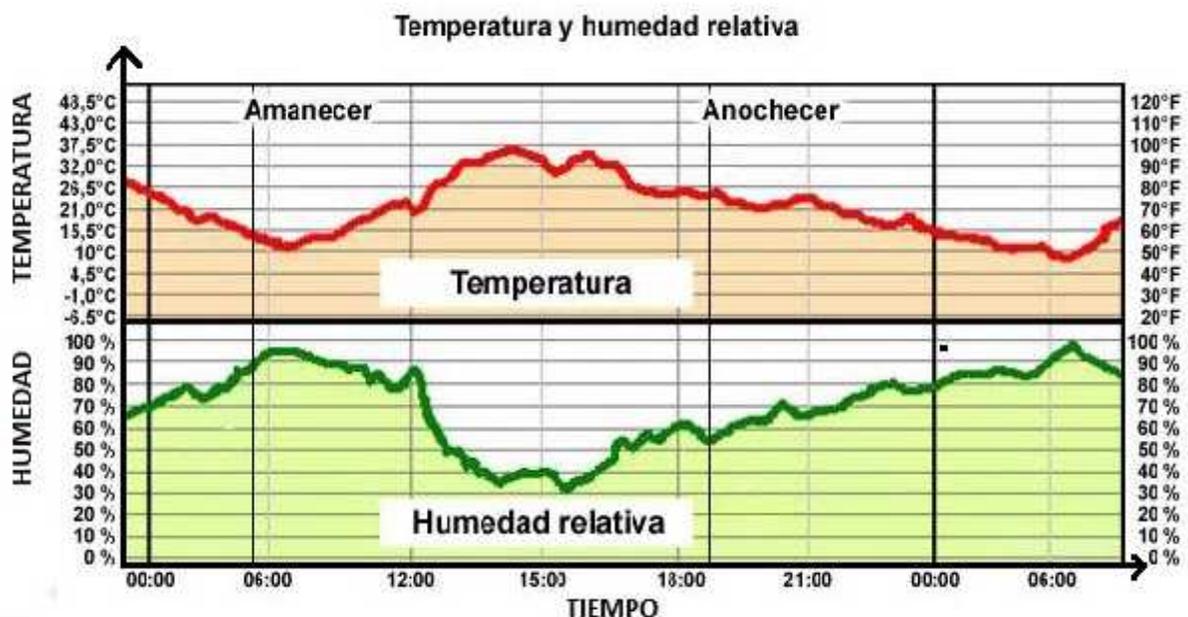


Figura. 3.15. Registro higrotermográfico de la temperatura y humedad relativa

3.5.3 Dióxido de Carbono (CO₂)

El promedio actual de emisiones de CO₂ en el aire en condiciones normales oscila alrededor de 380 ppm o sea el 0,038% de la atmósfera. Pero este valor promedio de concentración se ha visto alterado por el lado de la naturaleza cuando hay presencia incendios forestales los cuales aumentan su concentración en el ambiente. Cuando se ha iniciado un incendio forestal, el proceso de combustión de los materiales vegetales trae como consecuencia emanaciones de dióxido de carbono que son esparcidas alrededor del fuego donde fueron originadas. La medición de este factor adicional, nos ayudará a mejorar la detección del sistema de monitoreo, motivo por lo cual consideraremos esta variable en el diseño de la red [20].

CAPITULO 4

IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO

4.1 SELECCIÓN DEL ESCENARIO DE PRUEBA

4.1.1 Ubicación Geográfica

El escenario de implementación que pudimos disponer para la ejecución de las pruebas de operación de la red diseñada se dio lugar en las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE, institución que nos aprobó el uso de un espacio verde con características similares a un ambiente forestal.

La ubicación exacta del sitio lo podemos observar en la figura. x.x. mediante una vista satelital que nos determina la posición en las coordenadas:

Latitud:-0.311660

Longitud:-78.446470



Figura. 4.1. Vista Satelital de la Ubicación de la Red

4.1.2 Características del Escenario

En este escenario pudimos observar las siguientes características que nos resultaron muy ventajosas por su similitud con un bosque forestal:

- Presencia de árboles ubicados aleatoriamente
- Suelo cubierto por material vegetativo seco
- Filtraciones de Luz solar
- Área aproximada: 81 m²



Figura. 4.2. Escenario de Implementación

4.1.3 Dimensionamiento Físico

En base al área disponible se desplegaron los sensores con una separación de 3m entre nodo y nodo, manteniendo un radio de censado de 1.5m por cada uno. En cuanto a la distancia de la red con la estación base, se dispuso una separación de 10m.



Figura. 4.3. Dimensionamiento Físico de la Red

4.2 MATERIALES

4.2.1 Materiales de Acoplamiento de la Red

Los materiales que se utilizó para el acoplamiento de cada nodo-sensor en el escenario forestal son los siguientes:

- Recipientes Plástico
- Correa de sujeción regulable
- Cinta doble faz

En el recipiente introducimos el dispositivo inalámbrico con todos sus componentes, los cuales fueron adheridos con cinta doble faz para asegurar su estabilidad dentro del recipiente, y con la correa de sujeción encajamos toda la estructura en el árbol.



Figura. 4.4. Acoplamiento del Nodo

4.2.2 Materiales para Simulacro de Incendio

Los materiales que se utilizaron para ejecutar el simulacro de incendio forestal son los siguientes:

- Combustible
- Vegetación Seca
- Encendedor
- Recipiente de metal
- Extintor de CO₂



Figura. 4.5. Materiales para simulacro de Incendio

CAPITULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 PLANIFICACIÓN DEL EXPERIMENTO

La planificación del experimento es el proceso que nos ayudará a detectar si uno o mas factores influyen en la respuesta del sistema de monitoreo de incendios forestales, mediante la variación y la observación de las condiciones habituales del entorno donde se ha implementado la red. El proceso de planificación comprende los siguientes pasos:

5.1.1 Objetivos del experimento

- Comparar la respuesta del sistema de monitoreo de incendios forestales en diferentes niveles de observación de las variables influyentes.
- Determinar las principales causas de variación en la respuesta del sistema.
- Detectar bajo qué condiciones el sistema presenta la respuesta adecuada para la detección de incendios forestales.

5.1.2 Definición de Variables

Es fundamental conocer los factores que inciden en el sistema diseñado y estimar esta influencia. Para esto se colocó la red de sensores en el escenario implementado y se tomó mediciones de temperatura, humedad relativa y dióxido de carbono por un periodo de 6 horas, desde las 10:00 de la mañana hasta las 16:00 de la tarde durante 4 días en una semana. En este lapso de tiempo pudimos distinguir factores cuyo efecto sobre la respuesta del sistema fue de particular interés. Por lo tanto las variables quedaron definidas de la siguiente manera:

Variables influyentes:

- Luz Solar
- Fuego

Variables respuesta:

- Temperatura Ambiente
- Humedad Relativa
- Dióxido de Carbono

5.1.3 Procedimiento Experimental

El procedimiento experimental son los pasos o la forma como se tomaron las mediciones para estudiar los efectos y respuestas del sistema experimental. Para nuestro caso se tomaron diferentes pruebas bajo las siguientes condiciones:

- Cantidad fija de nodos
- Una combinación de variables influyentes para cada prueba
- Selección de periodo de tiempo que cumpla con las anteriores

PRUEBA 1: Para esta prueba utilizamos 8 nodos-sensores colocados en cada árbol manteniendo una topología tipo malla.

El escenario de prueba se implementó bajo la siguiente combinación de variables influyentes:

- Sin exposición de luz solar directa hacia los nodos
- Sin presencia de fuego



Figura. 5.1. Escenario de Prueba 1

Del tiempo total de mediciones se tomó una muestra de 30 minutos que cumplió con las condiciones anteriores para observar los efectos sobre las variables respuesta.

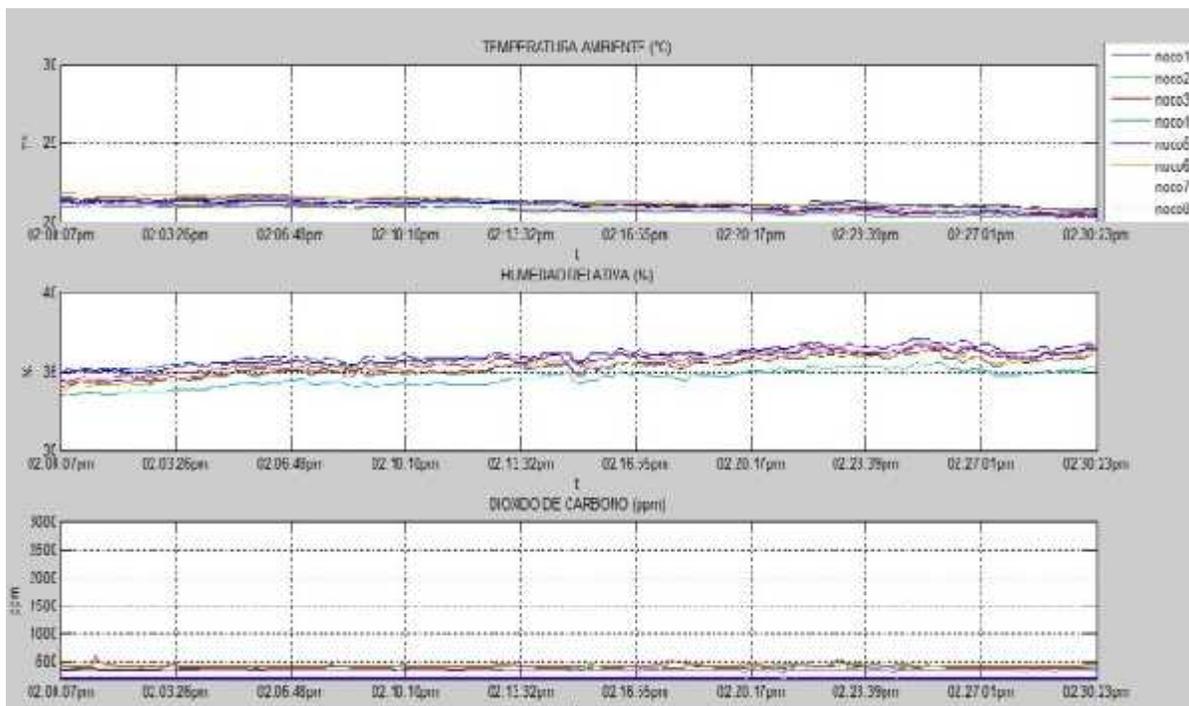


Figura. 5.2. Resultados de Prueba 1

Como resultado de esta prueba podemos observar que las mediciones de las variables respuesta de todos los nodos mantienen un comportamiento aproximadamente lineal y uniforme en función de la variación del tiempo. A medida que aumenta los valores de temperatura notamos una disminución de la humedad relativa, mientras que las mediciones de CO_2 mantienen un valor constante a lo largo del tiempo de operación. Los valores promedio obtenidos de cada variable ambiental de los nodos en este periodo de prueba son:

Temperatura ambiente: 22°C

Humedad Relativa: 35%

Concentración de CO_2 : 400 ppm

PRUEBA 2: Utilizamos los mismos 8 nodos ubicados en cada árbol manteniendo la topología tipo malla.

El escenario de prueba se implementó bajo la siguiente combinación de variables influyentes:

- Con exposición directa de luz solar hacia los nodos 4 y 6
- Sin presencia de fuego

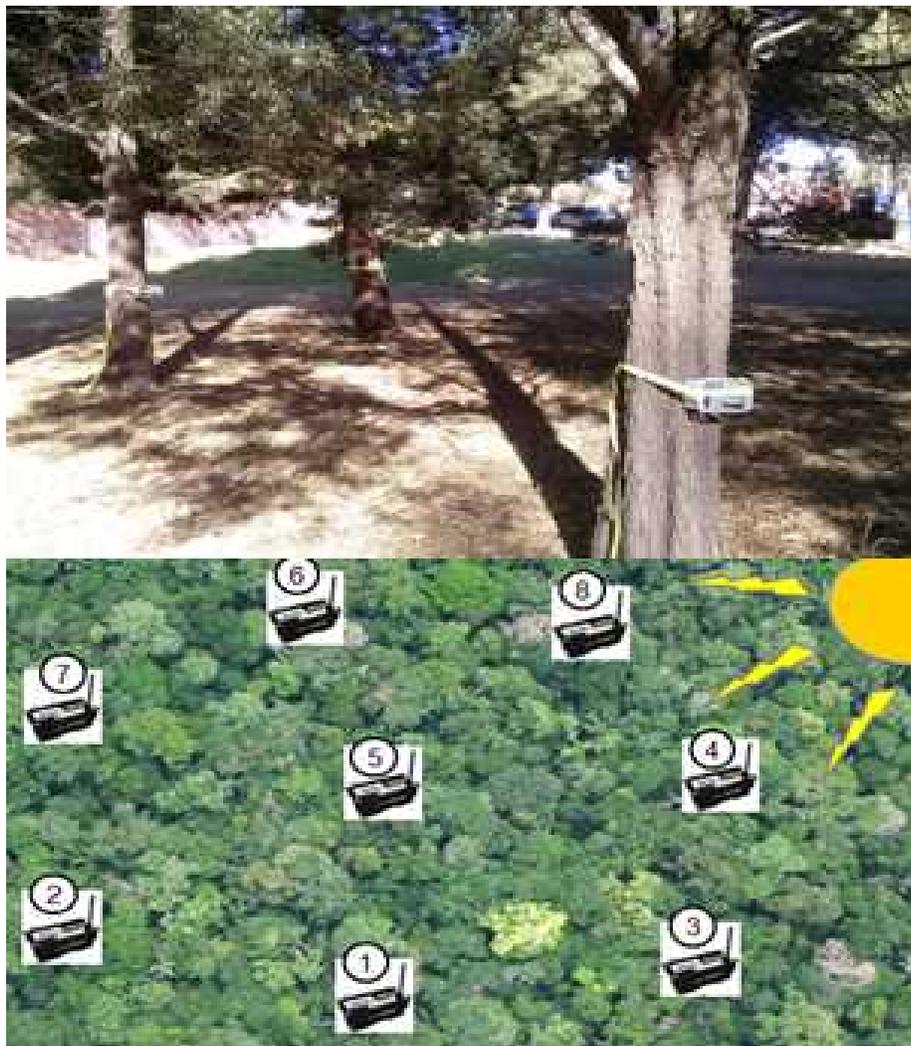


Figura. 5.3. Escenario de Prueba 2

Del tiempo total de mediciones se tomó una muestra de 40 minutos que cumplió con las condiciones anteriores para observar los efectos sobre las variables respuesta.

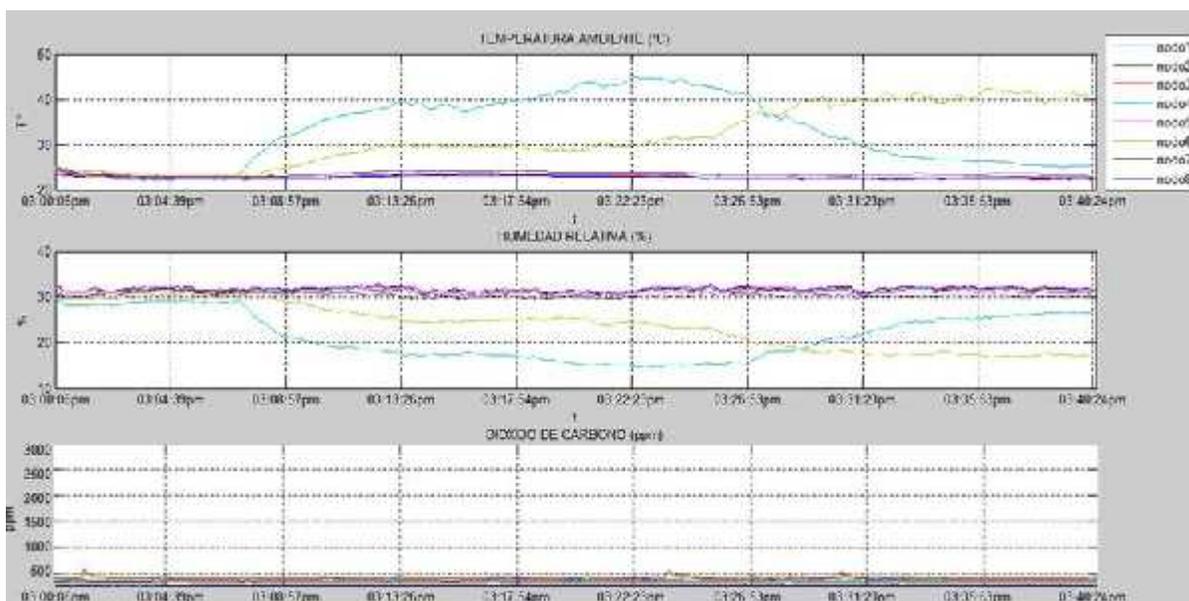


Figura. 5.4. Resultados de Prueba 2

La gráfica 5.4 nos indica que los nodos 4 y 6 varían significativamente sus valores de temperatura y humedad con respecto a los demás nodos que presentan un comportamiento lineal y uniforme en sus mediciones. A medida que la temperatura aumenta, la humedad relativa disminuye y los valores de concentraciones de CO_2 permanecen constantes en función de la variación del tiempo.

Los valores promedio obtenidos de cada variable ambiental de los nodos que estuvieron expuestos a luz directa del sol en este periodo de prueba son:

Temperatura ambiente: 36°C

Humedad Relativa: 19%

Concentración de CO_2 : 400 ppm

PRUEBA 3: Utilizamos los mismos nodos ubicados en cada árbol manteniendo la topología tipo malla.

El escenario de prueba se implementó bajo la siguiente combinación de variables influyentes:

- Sin exposición directa de luz solar hacia los nodos
- Con presencia de fuego



Figura. 5.5. Escenario de Prueba 3

Del tiempo total de mediciones se tomó una muestra de 60 minutos que cumplió con las condiciones anteriores para observar los efectos sobre las variables respuesta.

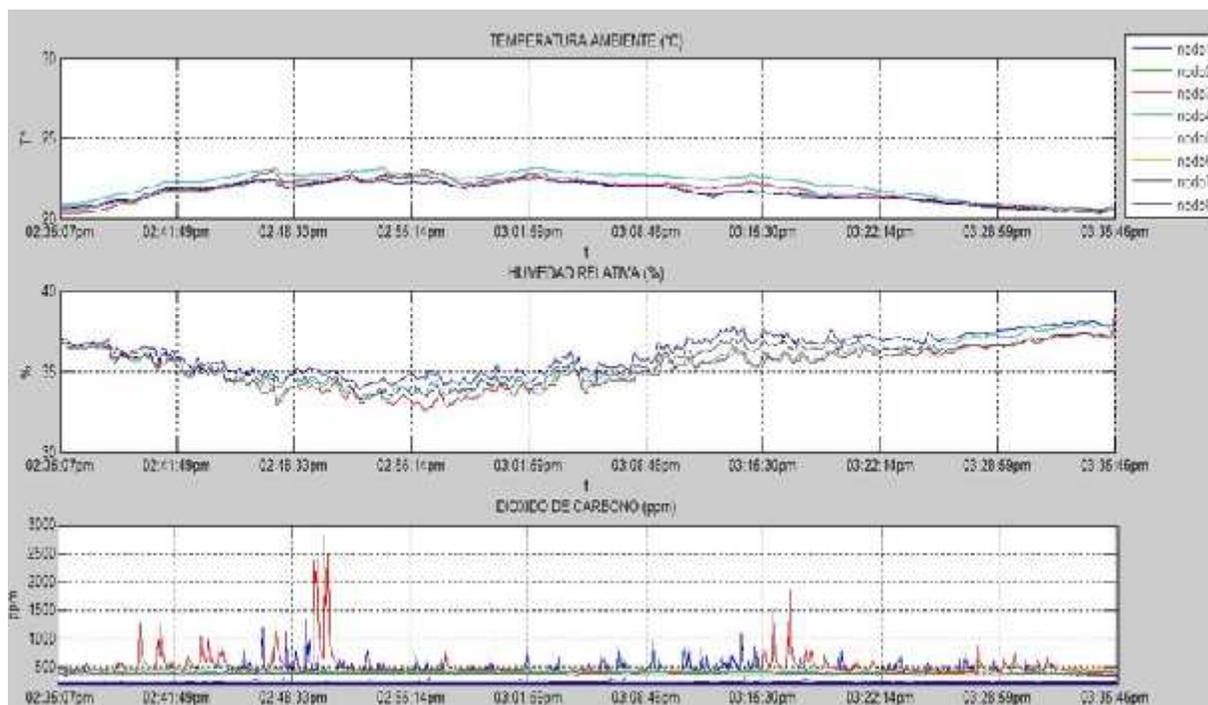


Figura. 5.6. Resultados de Prueba 3

Las gráficas de la figura. 5.6. nos reflejan un comportamiento curvilíneo uniforme de las mediciones de temperatura y humedad en todos los nodos. Observamos que mientras hay un aumento de temperatura, la humedad relativa disminuye y viceversa. En la gráfica de medición de Dióxido de Carbono observamos variaciones aleatorias de concentraciones de CO_2 en función del tiempo.

Los valores promedio obtenidos de cada variable ambiental de todos los nodos en este periodo de prueba son:

Temperatura ambiente: 23°C

Humedad Relativa: 34%

Concentración de CO_2 : 820 ppm

PRUEBA 4: Utilizamos los mismos nodos ubicados en cada árbol manteniendo la topología tipo malla.

El escenario de prueba se implementó bajo la siguiente combinación de variables influyentes:

- Con exposición directa de luz solar hacia los nodos 4, 6 y 8
- Con presencia de fuego



Figura. 5.7. Escenario de Prueba 4

Del tiempo total de mediciones se tomó una muestra de 60 minutos que cumplió con las condiciones anteriores para observar los efectos sobre las variables respuesta.

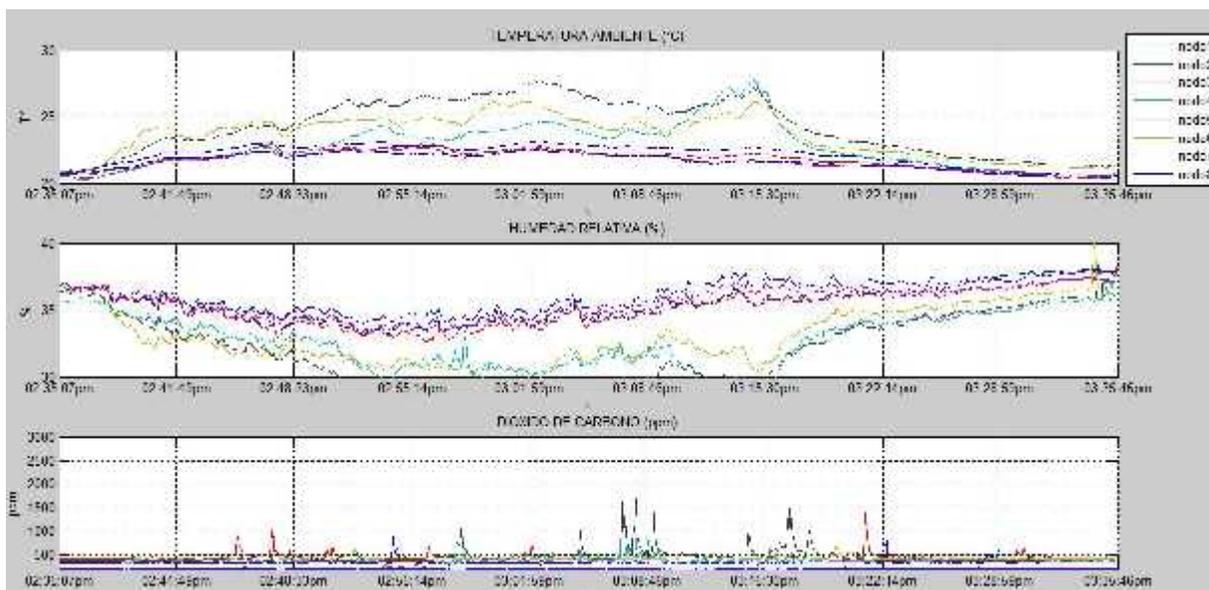


Figura. 5.8. Resultados de Prueba 4

Las gráficas de esta prueba en las condiciones dadas, nos indican un comportamiento curvilíneo de las mediciones de temperatura y humedad relativa de los nodos, excepto los nodos 4, 6 y 8 que varían significativamente su comportamiento con respecto a los demás. Observamos que si hay aumento de temperatura, la humedad relativa disminuye y viceversa. En la gráfica de Dióxido de Carbono tenemos valores aleatorios de concentración de CO_2 en función de la variación del tiempo. Los valores promedio obtenidos de cada variable ambiental de todos los nodos en este periodo de prueba son:

Temperatura ambiente: 26°C

Humedad Relativa: 32%

Concentración de CO_2 : 605 ppm

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.2.1 Correlación de variables

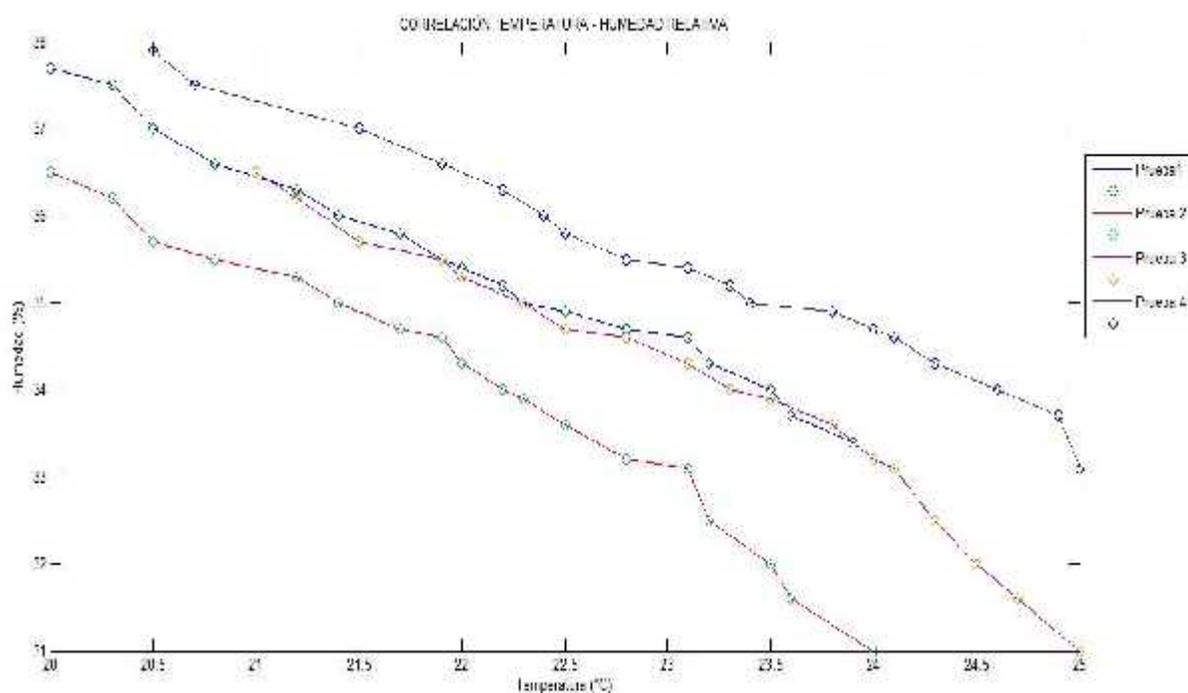


Figura. 5.9. Correlación Temperatura – Humedad Relativa

Calculando la correlación entre las variables temperatura y humedad relativa para todas las pruebas anteriores, obtuvimos un valor promedio de **-0.92**, lo que nos indica una íntima relación de dependencia e inversamente proporcional. Como podemos observar en la figura. x.x. a medida que aumenta la temperatura, la humedad relativa tiende a disminuir, cumpliéndose la misma relación para todas las pruebas realizadas.

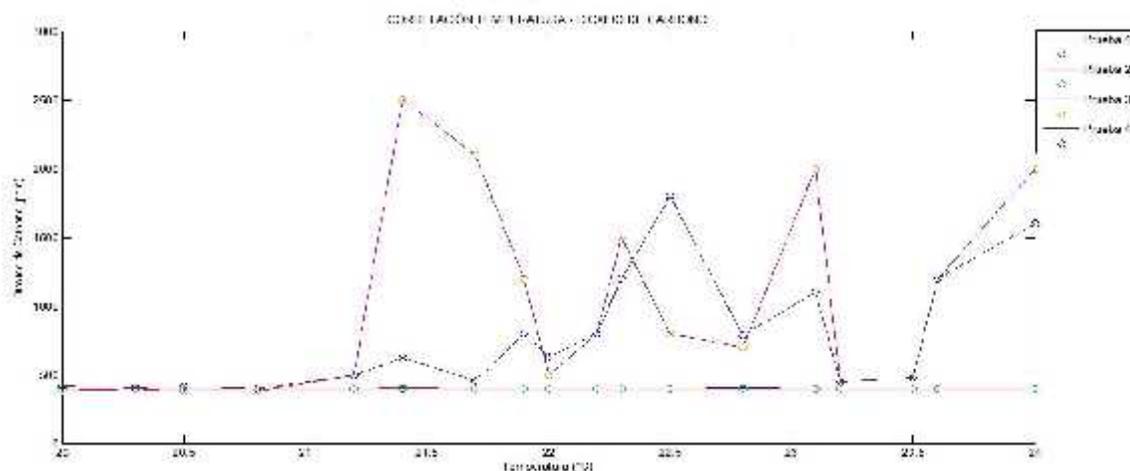


Figura. 5.10. Correlación Temperatura – Dióxido de Carbono

Calculando la correlación entre las variables temperatura y el dióxido de carbono obtuvimos un valor promedio de **0.11** para todas las pruebas realizadas. Comprobamos entonces que no existe una relación de dependencia entre estas variables como podemos observar en la figura. x.x.

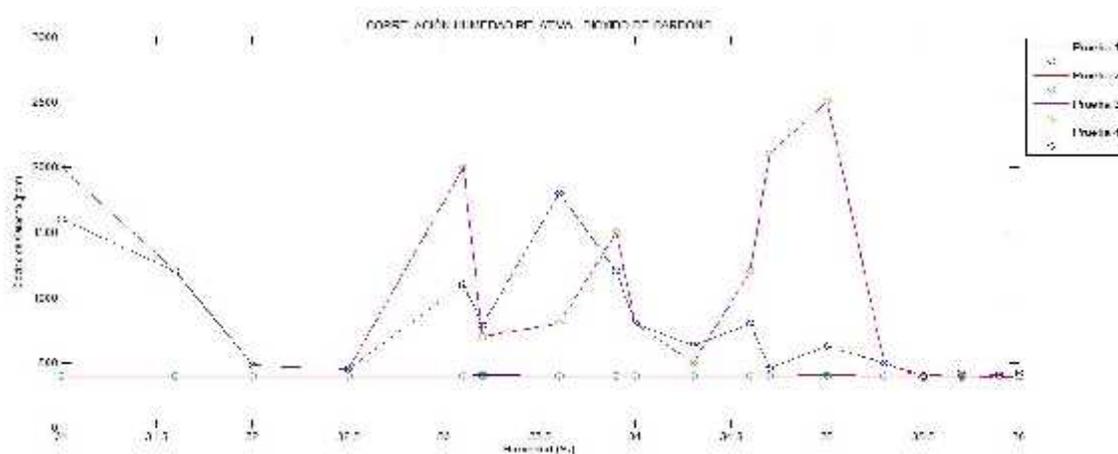


Figura. 5.11. Correlación Humedad Relativa – Dióxido de Carbono

Calculando la correlación entre la humedad relativa y el dióxido de carbono obtuvimos un valor promedio de **-0.09** para todas las pruebas realizadas. Comprobamos que tampoco existe una relación de dependencia entre estas variables como podemos observar en la figura. 6.11.

5.2.2 Análisis de las Pruebas

Prueba 1 (Sin presencia de fuego ni exposición directa a luz solar)

Bajo estas condiciones el sistema de monitoreo de incendios forestales realiza mediciones legibles de temperatura, humedad relativa y dióxido de carbono, las cuales al no ser afectadas por ningún factor externo mantienen un comportamiento aproximadamente lineal en función de la variación del tiempo. En esta prueba el valor promedio de temperatura ambiental es de 22(°C), humedad relativa 35(%) y dióxido de carbono 400(ppm).

Prueba 2 (Con exposición de luz directa y sin presencia de fuego)

En estas condiciones el sistema implementado realiza mediciones inadmisibles, que varían significativamente con respecto a los valores reales de temperatura y humedad relativa detectadas en el ambiente. El problema radica en que los dispositivos al estar expuestos directamente a rayos solares empiezan a calentarse internamente, lo cual altera el funcionamiento de los sensores que miden estas variables. En esta prueba el valor promedio de temperatura ambiental es de 36(°C) y 19(%) de humedad relativa. En cuanto a las mediciones de CO₂ no presentaron ninguna alteración y sus valores permanecieron en un valor constante de 400(ppm).

Prueba 3 (Sin exposición de luz directa y con presencia de fuego)

En estas condiciones el sistema implementado efectuó mediciones reales y concisas de los factores ambientales de temperatura, humedad relativa y dióxido de carbono. En este caso, con la presencia de fuego en el ambiente verificamos el aumento inmediato de temperatura y la disminución de humedad relativa; mientras que los valores de CO₂ manifestaron un incremento evidente pero aleatorio, donde el valor de su magnitud varió dependiendo de la cercanía del nodo al foco de fuego. En esta prueba el valor promedio de temperatura ambiental es de 23(°C), humedad relativa 34(%) y dióxido de carbono 820 (ppm).

Prueba 4 (Con exposición de luz directa y con presencia de fuego)

Con la presencia de fuego en esta prueba obtuvimos un aumento inmediato de temperatura, concentración de CO₂ y disminución de humedad relativa, pero en combinación con la exposición directa de luz solar sobre los nodos, los resultados se vieron alterados considerablemente, variando la magnitud de los valores medidos. Por lo tanto bajo estas condiciones el sistema implementado efectuó mediciones incoherentes de temperatura y humedad relativa, superando los valores reales que deberían ser medidos. En este caso el valor promedio de temperatura ambiental es de 26(°C), humedad relativa 32(%) y dióxido de carbono 605 (ppm).

Como análisis general de las pruebas realizadas podemos verificar que:

La variable Temperatura y la Humedad Relativa mantienen una íntima relación de dependencia al ser inversamente proporcionales.

La variación de Dióxido de Carbono es independiente de los efectos de luz solar pero si depende en gran medida de la presencia de fuego.

La magnitud de las variables respuesta de cada nodo dependerá de su cercanía respecto al foco de fuego.

El sistema de monitoreo de incendios forestales opera eficazmente siempre y cuando no haya exposición directa de luz solar sobre los nodos. Entonces si existe la presencia de fuego en la zona, habrá un incremento inmediato de concentraciones de CO₂, de temperatura y por ende una disminución proporcional de humedad relativa.

CONCLUSIONES

- Se estudió el estado del arte sobre Incendios Forestales y se analizó su comportamiento para tener una base de cómo diseñar un sistema de monitoreo de incendios forestales.
- Se estudió el estado del arte sobre las redes de sensores inalámbricos bajo el estándar IEE 802.15.4 y sus diferentes aplicaciones en el entorno ambiental.
- Se diseñó una red WSN, configurando los parámetros más adecuados que me permitieron asegurar la comunicación inalámbrica entre todos los dispositivos, la transmisión de la información hacia la base de datos y su visualización en una interfaz gráfica para el usuario.
- Se implementó una red de sensores inalámbricos auto-organizable, sencilla y de bajo consumo, que me permitió monitorear en tiempo real las variaciones de temperatura, humedad relativa y concentraciones de dióxido de carbono.
- Se verificó que el sistema implementado para el monitoreo de incendios forestales opera eficazmente siempre y cuando permanezca bajo condiciones de sombra, entonces si existe la presencia de fuego en la zona, habrá un incremento inmediato de concentraciones de CO₂, de temperatura y por ende una disminución proporcional de humedad relativa. Estas condiciones generadas en el mismo instante nos confirman la presencia de un incendio forestal.
- Corroboramos la teoría de dependencia entre dos variables ambientales, donde verificamos que al existir un aumento o disminución de la temperatura ambiente, la humedad relativa tiene un comportamiento inversamente proporcional a esta.

RECOMENDACIONES

- Usar de sistemas de alimentación de mayor capacidad (A/hr) para prolongar el tiempo de operación de nuestros nodos sensores y evitar la intervención frecuente del hombre para el reemplazo de los mismos.
- Al momento de realizar la instalación del software se recomienda instalar todos los componentes en la raíz de nuestra disco local (C:\) del computador para evitar conflictos o mal funcionamiento del software con su respectivo hardware.
- En la configuración de los nodos bajos el estándar IEEE 802.14.5, utilizar canales de transmisión no solapados con los canales de WIFI y potencias de transmisión no muy elevadas, para evitar interferencias con otros dispositivos que operen bajo esta tecnología.
- Diseñar una red de monitoreo forestal tomando en cuenta otros factores ambientales como la dirección del viento, la topografía del terreno, la densidad de la vegetación o la concentración de etileno presente en estos materiales combustibles para poder predecir con mayor exactitud el comportamiento de un incendio forestal e implementar un sistema de alerta eficaz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.W. Játiva, “Incendios Forestales en el Distrito Metropolitano de Quito 2012”, Tesis Pregrado, Dep. de Seguridad y Defensa, ESPE, Sangolquí, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7351/1/AC-IS-ESPE-047519.pdf>
- [2] Y.G. Molina (2006). Rev.For.Lat. *La participación Comunitaria en la prevención y combate de Incendios Forestales: Estrategias que la promueve*. [En línea]. pp. 107-123. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24143/2/articulo6.pdf>
- [3] Wikipedia. (2015), *Incendio Forestal*, [En Línea]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Incendio_forestal
- [4] T. Wark, et al, Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks, *Pervasive Computing*, Abril-Junio, 2007.
- [5] Universidad Politécnica de Valencia. (Ago, 2015). *Wireless Sensor Network*. Disponible en: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>
- [6] W. Zhang, et al, *Integrated wireless sensor/actuator networks in an agricultura application*. In Proceedings of the 2nd International Conference On Embedded Networked Sensor Systems, 2004.
- [7] M. Román, (2006), “Plan de prevención para emergencias por desastres Naturales en la Provincia de pichincha, su Organización y aplicación en la educación básica en la Próxima década”, Tesis de Masterado, Instituto de Altos Estudios Nacionales, Quito, Ecuador, 2012. [En Línea]. Disponible en: <http://repositorio.iaen.edu.ec/bitstream/24000/51/1/CD-IAEN-0110.pdf>

- [8] M.R. Prado, "Zonificación de riesgos derivados de inundaciones e Incendios de la ciudad de Sangolquí, mediante el Desarrollo de una aplicación Sig", Tesis de Grado, ESPE. Dep. Geográfica y Medio Ambiente, Sangolquí, Ecuador, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1045/1/T-ESPE-025137.pdf>
- [9] A. Mainwaring, et al, *Wireless sensor networks for habitat monitoring*, ACM WSNA'02, Atlanta: Septiembre, 2002, pp. 88-97
- [10] E.J. Cobos, "Estudio de las redes sensoriales como una nueva alternativa de comunicación inalámbrica", Tesis de Grado, ESPE. Dep. Electrónica y Telecomunicaciones, Sangolquí, Ecuador, 2007. [En línea] Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2372>
- [11] Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca., *Los Incendios Forestales*, 2012. [En Línea]. Disponible en: <http://www.bomberos.gob.ec/informacion-tecnica>
- [12] Bomberos de Navarra, *Extinción de Incendios Forestales*. [En Línea], Disponible en: http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/forestal2.pdf
- [13] *Los Incendios forestales*. [En Línea], Disponible en: http://www.escet.urjc.es/~pad/WEB2005/DOCENCIA/FAGS/15B_%20INCENDIOS%20FORESTALES.pdf
- [14] EDUCARM, *INCENDIOS FORESTALES*. [En Línea]. Disponible en: <http://servicios.educarm.es/templates/portal/ficheros/websDinamicas/20/tema1incendios.pdf>

- [15] A.B. Samaniego, et al, “Desarrollo de un Prototipo de Red Sensorial implementada con la Teconología Zigbee para monitorización de la Calidad del Agua”, Tesis Pregrado, Dep. de Electrónica y Eléctrica, ESPE, Sangolquí, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5881/1/T-ESPE-033914.pdf>
- [16] M.G. Pico, et al, “Análisis de Desempeño de Redes de Sensores Inalámbricas en Tiempo Real Aplicadas a Monitorización Volcánica”, Tesis Pregrado, Dep. de Electrónica y Eléctrica, ESPE, Sangolquí, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6074/1/T-ESPE-034947.pdf>
- [17] Xmesh User´s Manual, Revisión MEMSIC, California, Agosto 2012, pp. 1-130
- [18] S.X. Villacrés, “Análisis del desempeño de una red WPAN Basado en el estándar IEEE 802.15.4 utilizando Network Simulator 2”, Tesis Pregrado, Dep. de Electrónica y Eléctrica, ESPE, Sangolquí, 2009, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/120/1/T-ESPE-020306.pdf>
- [19] COMET METED, *Relaciones de Temperatura y Humedad Relativa*, 2013. [En Línea]. Disponible en: https://www.meted.ucar.edu/training_module_es.php?id=863
- [20] M. Leganés, *Ecologistas en Acción.*, Madrid, 2012. [En Línea]. Disponible en : <http://www.ecologistasenaccion.org/spip.php?article8550>
- [21] MPR-MIB Users Manual, Revisión MEMSIC, California, Agosto 2012, pp. 1-63
- [22] MTS/MDA Sensor Board Users Manual, Revisión D. MEMSIC, California, Agosto 2012, pp. 1-43

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

ACTA DE ENTREGA

El presente proyecto fue entregado en el Departamento de Eléctrica y Electrónica, y reposa en los archivos desde:

Sangolquí, 22 de septiembre de 2015

Elaborado por:



Wilian Andrés López Toro

Autoridad:



Ing. Darwin Alulema MSc.
Director de la Carrera de Ingeniería
en Electrónica y Telecomunicaciones

