



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:**

**Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la cordillera Chongón-Colonche**

**AUTOR:**

**Marvin Leonardo García Troya**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de  
Magister en Telecomunicaciones**

**TUTOR:**

**MSC. María Luzmila Ruilova Aguirre**

**Guayaquil, Ecuador**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**  
**INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Marvin Leonardo García Troya**, como requerimiento para la obtención del Título de **Magister en Telecomunicaciones**.

**TUTOR**

---

**MSC. Ruilova Aguirre, María Luzmila**

**DIRECTOR DE MAESTRÍA**

---

**MSC Romero Paz, Manuel**

**Guayaquil, 07 de marzo del 2019**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, GARCÍA TROYA MARVIN LEONARDO**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la cordillera Chongón-Colonche**, previo a la obtención del Título de **Magister en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, 07 de marzo del 2019**

**El Autor**

---

**García Troya Marvin Leonardo**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **GARCÍA TROYA, MARVIN LEONARDO**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la cordillera Chongón-Colonche**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, 07 de marzo del 2019**

**El Autor:**

---

**García Troya, Marvin Leonardo**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**MSC. Ruilova Aguirre, María Luzmila**  
**TUTOR**

---

**MSc. Manuel Romero Paz**  
**DIRECTOR DEL PROGRAMA**

---

**MSc. Orlando Philco Asqui**  
**REVISOR**



## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador, darme la fuerza y convicción para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Teresa Troya Mera y Leonardo Garcia Franco, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he podido llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.

A mi hermano Bismarck Garcia Troya por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindo a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis profesores y principales autoridades de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, quienes me proporcionaron la enseñanza y su amistad.

A mi tutora, Ing. Luzmila Ruilova Aguirre por su acertada guía y consejos para culminar con éxito el presente trabajo de titulación.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

¡Si alguien se queda afuera, se los dedico a todos!

## AGRADECIMIENTO

A través de estas líneas quiero expresar mi mas sincero agradecimiento a todas las personas que con su soporte científico y humano han colaborado en la realización de este trabajo de titulación

En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres Teresa Troya Mera y Leonardo Garcia Franco que me han ayudado y apoyado durante todo este tiempo, a mi tutor Ing. Luzmila Ruilova Aguirre, por haberme orientado en todos los momentos que necesité sus consejos.

De igual forma, agradezco a mi Director de la Maestría en Telecomunicaciones, Ing. Manuel Romero Paz que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento.

Así mismo, deseo expresar mi reconocimiento a la Facultad de Educación Técnica Para el Desarrollo por todas las atenciones e información brindada a lo largo de esta investigación.

A todos mis amigos y compañeros que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

Agradezco de manera muy especial a mi amiga, Andrea Alvarado quien me animo a salir de mi zona de confort e impulso a seguir esta especialización de una manera espontanea con su apoyo incondicional y sincero.

A la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en estos años.

## **Resumen**

La revolución de la tecnología WSN en los últimos años ha permitido aplicar esta tecnología con un potencial para la detección temprana de incendios forestales. Estos sensores deben ser auto organizados y seguir un algoritmo eficiente, interconectado con otras tecnologías o redes. El diseño de una red WSN ensayada en ambientes simulados es la propuesta para monitorear el bosque Protector Cerro Blanco, pero existen limitaciones, como el desvanecimiento de la señal, pues la densa vegetación produce retardo de propagación que incrementan pérdidas de la señal en el receptor de la red WSN y por ende el consumo de energía o agotamiento de batería en los nodos de la red. Se aplican métodos de investigación como la descriptiva que resume un estado de arte actualizado acerca de aplicaciones de WSN. El método sintético-analítico provee tomar en cuenta pérdidas de datos como una causa de agotamiento de batería y energía cuando una red comunica sus nodos en un ambiente con cientos de nodos sensores. Finalmente, en ambiente simulado se aplica el método empírico, pues con varias experimentaciones, se tiene resultados del rendimiento de transmisión y de sus niveles de energía en batería de sus nodos. La aportación del trabajo de titulación, indica que redes WSN podrían utilizar un protocolo bajo transmisión multi-salto durante un largo período de tiempo.

**Palabras claves:** Zigbee, WPAN, Energía consumida, Gateway, detección

## **Abstract**

The WSN technology revolution in recent years has allowed this technology to be applied with a potential for the early detection of forest fires. These sensors must be self-organized and follow an efficient algorithm, interconnected with other technologies or networks. The design of a WSN network tested in simulated environments is the proposal to monitor the Cerro Blanco Protector forest, but there are limitations, such as the fading of the signal, since the dense vegetation produces propagation delay that increases signal losses in the receiver. the WSN network and therefore the power consumption or battery exhaustion in the nodes of the network. Research methods such as the descriptive one that summarizes an updated state of art about WSN applications are applied. The synthetic-analytical method provides for data loss as a cause of battery and energy depletion when a network communicates its nodes in an environment with hundreds of sensor nodes. Finally, in a simulated environment, the empirical method is applied, since with several experiments, the results of transmission performance and battery energy levels of its nodes are obtained. The contribution of the titration work indicates that WSN networks could use a protocol under multi-hop transmission for a long period of time

Keywords: Zigbee, WPAN, Energy consumed, Gateway, detection

## INDICE GENERAL

Resumen .....	IX
Abstract .....	X
CAPITULO I: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Planteamiento del Problema .....	3
1.3 Objetivo General .....	3
1.4 Objetivos Específicos .....	3
1.5 Justificación.....	3
1.6 Metodología.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 Red de sensores inalámbricas .....	5
2.1.2 Operación de una WSN típica .....	6
2.1.2 Limitantes de WSN.....	7
2.2.2 Modelo de gestión dinámica de encendido DPM .....	9
2.3 Comunicación entre nodos sensores.....	11
2.4 Sistemas operativos para nodos sensores .....	14
2.4.1 Sistemas Operativos para red de sensores .....	15
2.4.2 Características de TinyOS .....	16
2.5 Hardware para red de sensores .....	20
2.5.1 Propuesta de monitoreo de incendios forestales .....	24
2.5.2 Hardware Wireless HART.....	26
2.5.2.1 Memoria externa .....	28
2.5.2.2 Fuente de alimentación .....	29

2.5.2.3	Modulación: Frecuencia de audio Shift Keying (AFSK).....	29
2.5.2.4	Modos de comunicación .....	30
2.5.2.5	Configuraciones de red .....	32
2.5.2.6	Capas de comunicación HART .....	33
2.5.2.7	Estructura de paquetes.....	33
2.6	Sistema de detección de incendios basado en WSN. ....	35
2.6.1	Esquema de implementación del sensor .....	36
2.6.2	Requerimientos de red WSN .....	36
2.7.	Arquitectura de red y diseño de topología.....	40
2.7.1	Protocolo de comunicación dentro del clúster con conocimiento del entorno .....	42
CAPÍTULO III: SIMULACIÓN DE RED WSN EN PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES .....		48
3.1	Experimentos de simulación y resultados .....	48
3.1.1	El simulador.....	48
3.2	Parámetros técnicos para la simulación.....	50
3.3	Protocolos de comunicación.....	55
CONCLUSIONES.....		65
RECOMENDACIONES .....		67
Referencias.....		68
ANEXO 1 .....		71
Anexo 2 .....		74

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Nodo sensor y red de sensores inalámbricos básicos. ....	7
Figura 2. 2 Modelo abstracto de un sistema de administración de energía. ....	10
Figura 2. 3 Direccionamiento y tramas de comunicación Zigbee.....	12
Figura 2. 4 Representación de maniobra de TinyOS .....	19
Figura 2. 5 Sólcalos del mote Gases Sensor Board v.30 de Libelium, .....	22
Figura 2. 6 Mote Gases Sensor Board v.30 de Libelium, .....	22
Figura 2. 7 Sistema de detección de incendios forestales .....	24
Figura 2. 8 Comparación entre los módulos de radio WirelessHART .....	27
Figura 2. 9 AFSK. Comunicación análoga y digital simultánea.....	30
Figura 2. 10 HART Comunicación Maestro-Eslavo entre un DCS y un dispositivo de campo. ....	31
Figura 2. 11 HART-comunicación de dos maestros entre una PC, terminal de mano y dispositivo de campo.....	32
Figura 2. 12 Arquitectura de red agrupada (árbol de clústeres) de diseño con nodos coordinadores .....	39
Figura 2. 13 Arquitectura de red hexagonal (malla) para WSN .....	40
Figura 3. 1 Captura de pantalla del simulador	48
Figura 3. 2 Diseño en topología Malla con el simulador	49
Figura 3. 3 Niveles de energía restantes de nodos desplegados regularmente y desplegados aleatoriamente	51
Figura 3. 4 Niveles de energía restantes de nodos desplegados regularmente y desplegados aleatoriamente. Hay 500 nodos en la red.	51

Figura 3. 5. Diferencia entre los niveles de energía de dos nodos en el mismo grupo/clúster (Hay	53
Figura 3. 6 Distancia entre ignición de fuego y sensor más cercano en esquemas de despliegue.	53
Figura 3. 7 Tiempo requerido para que los nodos sensores detecten la amenaza de incendio para varias distancias.	54
Figura 3. 8 Número de mensajes enviados al receptor	55
Figura 3. 9 Niveles de consumo de energía durante todo el año.	56
Figura 3. 10 Valor acumulado del nivel de consumo de energía de los modelos del medio ambiente a lo largo del año.	57
Figura 3. 11 Consumo de energía que nivela los valores del nivel de riesgo de incendio de los modelos base a lo largo del año	58
Figura 3. 12 Duraciones de detección de incendios de modelos basados en el medio ambiente durante todo el año.	59
Figura 3. 13 Duración de la detección de incendios los valores de nivel de riesgo de incendio de los modelos base a lo largo del año.	60
Figura 3. 14 Duración de la detección de incendios de modelos basados en el entorno y cantidad de clústeres	61
Figura 3. 15 Duraciones de detección de incendios de los modelos base y conscientes del medio ambiente varían según el número de sensores en un clúster.	62
Figura 3. 16 Extensión y cantidad de nodos para el Bosque Protector cerro Blanco	63
Figura 3. 17 Vista satelital del Bosque Protector cerro Blanco	64

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 2. 1 Consumo de los sensores del mote Gases Sensor Board v.30 .....	22
Tabla 2. 2 Características técnicas de módulos motes .....	25
Tabla 2. 3 Protocolo HART y modelo OSI.....	33
Tabla 2. 4 Estructura de un paquete HART .....	33
Tabla 2. 5 Análisis de un paquete HART .....	34

## **CAPITULO I: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **1.1 Introducción**

La aparición de redes inalámbricas de sensores (WSN) es esencialmente la última tendencia de la Ley de Moore hacia la miniaturización y la ubicuidad de los dispositivos informáticos. Típicamente, un nodo de sensor inalámbrico consiste en componentes de detección, computación, comunicación, actuación y potencia.

Una red de sensores inalámbricos (WSN) consiste en sensores autónomos distribuidos espacialmente para controlar las condiciones físicas o ambientales, como temperatura, sonido, vibración, presión, movimiento o contaminantes y para pasar sus datos de forma cooperativa a través de la red a una ubicación principal. Las redes más modernas son bidireccionales y también permiten el control de la actividad del sensor. En la actualidad, estas redes se usan en muchas aplicaciones industriales, como la supervisión y el control de procesos industriales, la supervisión de la salud, medición de los flujos de tráfico, la vigilancia o monitoreo de contaminantes ambientales, entre otros más.

Un nodo sensor generalmente es un sistema basado en microcontrolador que incorpora un módulo de Radio Frecuencia (RF), una unidad de sensorización, encargada de recoger los datos del entorno, todo ello alimentado mediante una batería.

Los nodos sensores se coordinan entre sí para producir información de alta calidad sobre el entorno físico. Cada nodo sensor basa sus decisiones en su misión, la información que tiene actualmente, y su conocimiento de su computación, comunicación y recursos energéticos. Cada uno de estos nodos de sensor dispersos tiene la capacidad de recopilar y enrutar datos ya sea a otros sensores o de vuelta a una estación base externa.

Una estación base puede ser un nodo fijo o un nodo móvil capaz de conectar la red de sensores a una infraestructura de comunicaciones existente o a Internet donde un usuario pueda tener acceso a los datos reportados. Estos nodos sensores son capaces de recopilar y difundir datos en áreas donde las redes ordinarias no son adecuadas por razones ambientales o estratégicas.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

Existen limitaciones como desvanecimiento de la señal en una red WSN cuando vigila conatos de incendios en ambientes externos como bosques, pues la densa vegetación, como plantas o árboles altera la comunicación pues la difracción, refracción de la señal incrementan pérdidas de la señal en el receptor y esto produce agotamiento de la energía de batería en sus nodos, un aspecto negativo cuando está operando la WSN. La presencia de incendios forestales ha provocado desastres en el entorno de la vegetación y hábitat de especies nativas, esto es un problema circunstancial debido a factores como causas naturales como rayos e incluso por el mismo hombre. El Bosque protector Cerro Blanco es área protegida de la cordillera de Chongón- Colonche aspecto vital por el ecosistema de provincias como Guayas, Santa Elena y Manabí.

## **1.3 Objetivo General**

Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la cordillera Chongón-Colonche

## **1.4 Objetivos Específicos**

- 1) Caracterizar la red de Sensores Inalámbricos WSN mediante el estado del arte.
- 2) Realizar simulaciones de una red WSN ante un conato de incendio.
- 3) Simular métricas del modelo de consumo energía en nodos de una WSN para evaluar el desempeño frente presencia de incendios forestales.

## **1.5 Justificación**

La revolución de la tecnología WSN en los últimos años ha permitido aplicar esta tecnología con un potencial para la detección temprana de incendios forestales. Los nodos pueden estar equipados con sensores para medir la temperatura, la humedad y los gases que se producen por los incendios en los árboles o la vegetación. El Bosque protector Cerro Blanco es área protegida de la cordillera de

Chongón- Colonche aspecto vital por el ecosistema de provincias como Guayas, Santa Elena y Manabí. La detección temprana de fuego es crucial para una acción exitosa de los bomberos; gracias a las redes de sensores inalámbricos, el cuerpo de bomberos y especialistas en el área podrán saber cuándo se inicia un incendio y cómo se propaga.

## **1.6 Metodología**

El presente trabajo de titulación en Maestría de Telecomunicaciones emplea tres métodos de investigación; se utiliza la metodología descriptiva pues se tomará en cuenta el estado del arte de redes de sensores inalámbricos (WSN). Se emplea también el método analítico-sintético por cuanto se examina métricas de energía consumida y tiempo de respuesta entre nodos y equipo sumidero o gateway en una red que supervise conatos de incendios. Finalmente se emplea el método empírico el cual es explícito por eventos de simulaciones de escenarios exteriores para una red WSN para detección de incendio en un bosque, Los nodos solo proporcionan datos de sensores de temperatura para detectar el incendio y la decisión se basará en el comportamiento de la red, la simulación de eventos discretos.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronic Engineers*) creó en 1999 el grupo de trabajo IEEE 802.15, dedicado específicamente al estudio de redes de área personal (PAN) y consecutivamente las redes inalámbricas de área personal WPANs (Wireless Personal Area Network), las cuales tienen un escenario inalámbrico de gran despliegue en términos de acercar la red al usuario y de integrar todos los servicios en base a conseguir una automatización total del entorno de forma que se obtenga un esquema de comunicaciones y de monitorización completo en base a la misma infraestructura

Con este breve antecedente una red WPAN tiene como objetivo el manejo de baja velocidad de datos, son dispositivos de bajo costo con baterías de larga duración lo que es muy adecuado para las redes de sensores inalámbricos WSN y puede ser incluido en una amplia gama de productos y aplicaciones.

### **2.1 Red de sensores inalámbricos**

Desde una década atrás, se ha tratado de diseñar sistemas de adquisición de datos basado en WSNs con muestreo de alta frecuencia y sincronización en el tiempo sin embargo solo se sujeta a un pequeño tamaño del paquete de datos de dicha red. Aumentar el tamaño del paquete solo puede llevarse a cabo cuando los sensores inalámbricos poseen una cantidad considerable de memoria RAM.

Alrededor del 2008, se diseñó, calibró y desarrolló un nodo sensor de acelerómetro para satisfacer los requisitos de monitoreo de vibraciones estructurales e identificación de modelos. El WSN se basa en el sistema operativo TinyOS2 para proporcionar una plataforma de software flexible y un rendimiento escalable.

En cuanto al hardware, un microcontrolador para procesar cada nodo tiene alrededor de cuatro canales bidireccionales y dispositivo de radiofrecuencia (RF) para comunicarse de forma inalámbrica. Este prototipo se implementó en un puente de tramo largo con 64 nodos, obteniendo datos precisos de vibración ambiental para identificar los modos de vibración de un puente.

La detección y prevención de incendios forestales es otro problema real que enfrentan varios países. Se han iniciado diferentes métodos para monitorear la

aparición de incendios. Los primeros métodos se basaban en torres de observación tripuladas, pero esta técnica era ineficiente y no totalmente efectiva. Posteriormente, se probaron los sistemas de vigilancia por cámara y las tecnologías de imágenes satelitales, pero esto también resultó ineficaz para poder controlar de manera eficiente el inicio inicial del incendio en la superficie. Por ejemplo, las redes de cámaras se pueden instalar en diferentes posiciones en los bosques, pero proporcionan solo imágenes de línea de visión y pueden verse afectadas por condiciones climáticas y/o obstáculos físicos.

Las imágenes de satélite demuestran ser más eficientes que la cámara de vigilancia, donde se utilizaron las imágenes reunidas por dos satélites, el radiómetro avanzado de muy alta resolución (Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR), lanzado en 1998 y el espectroscopio de imagen de resolución moderada (Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer MODIS), lanzado en 1999. Desafortunadamente, estos satélites pueden proporcionar imágenes de las regiones de la tierra cada dos días y eso es a lo largo del tiempo para el escaneo de fuego, además de que la calidad de las imágenes de satélite puede verse afectada por las condiciones climáticas. (Alkhatib, 2013).

### **2.1.2 Operación de una WSN típica**

Una red de sensores inalámbricas WSN puede definirse como un grupo de nodos independientes, que se comunican de forma inalámbrica a través de frecuencia y ancho de banda limitados. A medida que avanza la tecnología, también aumentan las capacidades de las redes de sensores, limitado sólo por lo que puede ser tecnológicamente detectado, se prevé que WSN desempeñará un papel importante en nuestra vida diaria.

En la figura 2.1 se muestra el esquema de un nodo sensor de WSN.

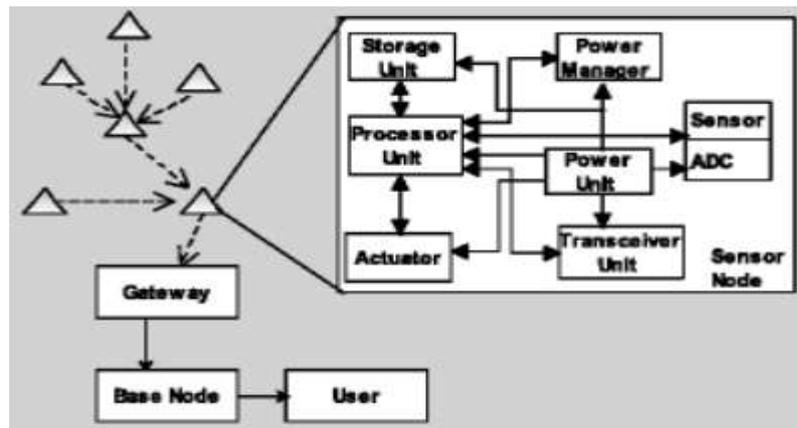


Figura 2. 1 Nodo sensor y red de sensores inalámbricos básicos.

Fuente: (Pugha & Sharma, 2015)

Un nodo principal es el master o coordinador que recibe los datos de cada nodo sensor o dispositivo final, el monitoreo según los fabricantes de los módulos pueden ser transmitidos en tiempo real. Los dispositivos finales son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio transceptor (RF) y un elemento sensor. Los nodos actúan como elementos de la infraestructura de comunicaciones al reenviar los mensajes (datos) transmitidos por nodos más lejanos hacia al centro de coordinación (nodo master/coordinador).

### 2.1.2 Limitantes de WSN

Las WSNs realizan varias aplicaciones como monitoreo continuo, detección de anomalías, control de potencia industrial, uso comercial, dispositivos médicos relacionado con el cerebro y el corazón, etc. El factor limitante es que tienen limitaciones de energía y, por lo tanto, los investigadores están diseñando tecnologías y algoritmos para mejorar su eficiencia energética y reducción de potencia.

Aunque los sistemas integrados actuales utilizan componentes de hardware de muy baja potencia, los componentes de un nodo sensor (es decir, sensores, microcontroladores, convertidor analógico a digital, memoria y transceptor) funcionan utilizando diferentes tecnologías que pertenecen a algunos problemas de diseño de hardware/software. Por lo tanto, se debería enfatizar las áreas en las que

se puede mejorar la eficiencia energética de un nodo sensor y toda la red. Estas son la red con aspectos de: el enrutamiento, la agrupación, el circuito, la tecnología, el sistema operativo y la capa de acceso medio.

Según Pughat & Sharma (2015) concuerdan que los componentes de hardware principales de un nodo de sensor, tiene un bloque de control de potencia, que efectivamente ayuda a controlar el consumo de energía del nodo y, por lo tanto, ‘alarga’ la vida de toda la red. Al observar el patrón de comportamiento y comunicación, una WSN basada en eventos se comunica solo cuando ocurre el evento.

El patrón de llegada del evento llamado carga de trabajo puede seguir un patrón de distribución normal, exponencial o de Poisson. Esto muestra cómo la distribución gaussiana ofrece diferentes capacidades de detección en diversas áreas en el caso de las aplicaciones impulsadas por eventos. (Yun, Weihuang , & Agrawal, 2013). El análisis de distorsión de la energía utilizando el enfoque de detección adaptativa para aplicaciones de monitoreo del medio ambiente disminuye el consumo de energía de la red al colocar los sensores de forma adaptativa en modo pasivo. Estudios y experimentos con WSNs en modo pasivo ha ahorrado más energía operando los componentes del nodo en condición de baja energía o pasivo siempre que sea posible.

Un nodo sensor modelado mediante un enfoque estocástico controla la energía del nodo en sus estados operativos y mejora la vida útil de un nodo al operar los componentes a los niveles de potencia deseados. Se ponen a ‘dormir’, cambian a modos de baja potencia o se apagan cuando sea necesario. El enfoque Dynamic Power Management (DPM) realiza un seguimiento de las actividades del sistema, la técnica DPM se implementa en el sistema operativo del nodo del sensor. Por lo tanto, el ahorro de energía mediante la administración de energía dinámica y la programación adecuada de los eventos de entrada es esencial para extender la vida útil de los nodos de sensores integrados.

Un sistema operativo basado en componentes llamados “motas”, del inglés “mote”, son dispositivos electrónicos capaces de captar información

proveniente del entorno en el que se encuentran, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro destinatario.

### **2.2.2 Modelo de gestión dinámica de encendido DPM**

El DPM se conoce como un algoritmo/técnica de nivel de sistema operativo que se utiliza para controlar los parámetros de potencia y rendimiento de un sistema de baja potencia, al aumentar los intervalos de tiempo inactivo de sus dispositivos y al cambiar a dispositivos de bajo consumo. El reemplazo manual o la recarga de las baterías no es una tarea fácil o deseable. Por lo tanto, la forma en que la energía es utilizada por los diversos subsistemas de hardware de los nodos individuales afecta directamente el alcance y la utilidad de toda la red. Este documento proporciona una evaluación exhaustiva del estado del arte de la administración dinámica de energía (DPM) en redes inalámbricas de sensores. (Dargie, 2012)

Para maximizar la vida útil de la batería, el consumo de energía de los componentes del nodo del sensor debería reducirse. Por lo tanto, el problema de administración de energía minimiza la potencia de conmutación o el consumo de energía de los componentes. La potencia de conmutación se define como la potencia requerida para que el componente cambie de modo de baja potencia a modo de alta potencia y viceversa. El modelado estocástico se utiliza para estudiar DPM en una red de sensores inalámbricos para la administración de energía

Los investigadores están trabajando en los modelos estocásticos o de Markov para reducir el consumo de energía en diferentes áreas de tecnología y aplicación, como defensa, monitoreo, seguridad, etc. Se utiliza una política de decisión de Markov para obtener la operación óptima del nodo sensor, pero han elegido solo parámetros seleccionados como la frecuencia del procesador, la frecuencia del sensor y el voltaje del procesador.

En una aplicación donde un nodo necesita comunicarse y solo da información cuando un evento llega a su entrada, se requieren modelos impulsados por eventos para reducir el consumo de energía. Los modelos semi-Markov basados en eventos son más flexibles, menos complejos que los modelos de tiempo discretos y continuos. Consumen menos energía porque los componentes del nodo se activan solo cuando el evento deseado llega a la entrada. Por lo tanto, los eventos deseados

se procesan y se comunican más a sus nodos vecinos o coordinador. (Pughat & Sharma, 2015).

En la figura 2.2 se aprecia un esquema de nodo sensor con DPM.

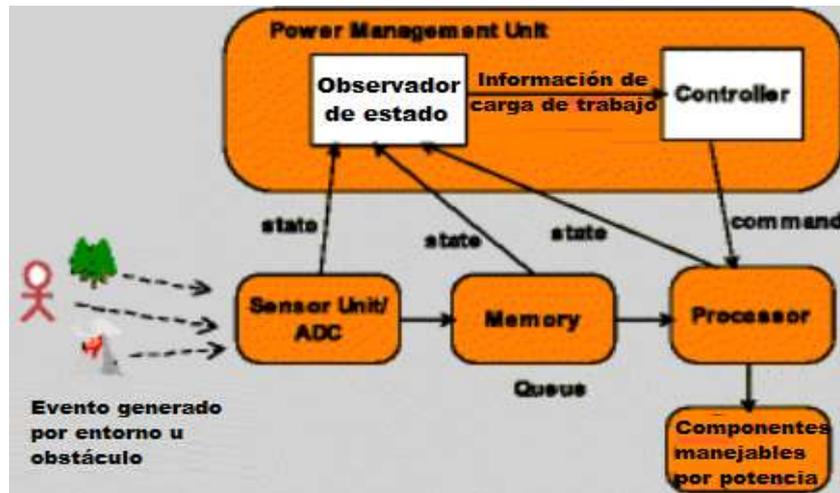


Figura 2. 2 Modelo abstracto de un sistema de administración de energía.

Fuente: (Pugha & Sharma, 2015)

El modelo del sistema consta de un administrador de energía (PM), un proveedor de servicios (procesador), un solicitante de servicios (entrada de sensores) y una cola de solicitud de servicios (memoria). La actividad de los diferentes dispositivos en WSN puede ser en tiempo discreto, tiempo continuo y evento impulsado también que afectan la duración de la batería. El comportamiento de evento temporal en toda la región de detección se puede suponer como un proceso de Poisson con una tasa de evento promedio. (Pughat & Sharma, 2015).

El administrador de energía rastrea los estados de proveedor de servicio, solicitante de servicio, cola de servicio y da señales de comando para controlar los modos de energía del sistema y los componentes de administración de energía que están inactivos y esperando el próximo comando. El administrador de energía puede ser un componente del módulo de software o hardware. Se puede implementar un enfoque de modelado estocástico adecuado en el nivel del sistema operativo para lograr una mejor eficiencia energética a un menor costo.

El esquema estocástico o la Política de decisión de Markov (MDP) modelan un sistema y su carga de trabajo, se considera la carga de trabajo a la llegada de la solicitud y la información asociada a ella.

El análisis y modelado existentes de esquemas DPM se han aceptado con la longitud de la cola de tareas de espera como un parámetro de medición de latencia. Sin embargo, la fecha límite de ejecución de la tarea es una latencia o parámetro de rendimiento importante en los modelos de Markov. La administración de energía dinámica obtiene el tiempo de conmutación de potencia correcto después de observar la carga de trabajo y los estados del componente del sistema a un costo de rendimiento.

Por lo tanto, la necesidad básica de DPM es un sistema operativo integrado (sistema micro-operativo en el caso del nodo sensor) los componentes de administración de energía que soportan diferentes estados de energía, por ejemplo, activos, inactivos e inactivos.

### **2.3 Comunicación entre nodos sensores**

Tomando en cuenta la tecnología Zigbee, un esquema de comunicación en una aplicación WSN para agricultura de precisión, se debe entender que cada transmisión significa consumo de energía y por lo tanto estos sistemas presentan el problema de la limitación en la cantidad de datos a transmitir.

En la figura 2.3 se muestra la forma de comunicación entre el nodo coordinador principal ubicado en una casa (cooperativa de agricultores) y el gateway (nodo coordinador que estará comunicándose con dispositivos finales (nodos equipados con cámara, sensores, etc.). Dos mecanismos de acceso al canal se implementan en 802.15.4. Para una red ‘sin balizas’, un estándar ALOHA CSMA-CA envía reconocimientos positivos para paquetes recibidos correctamente. En una red ‘con balizas’, una estructura de ‘supertrama’ se usa para controlar el acceso al canal.

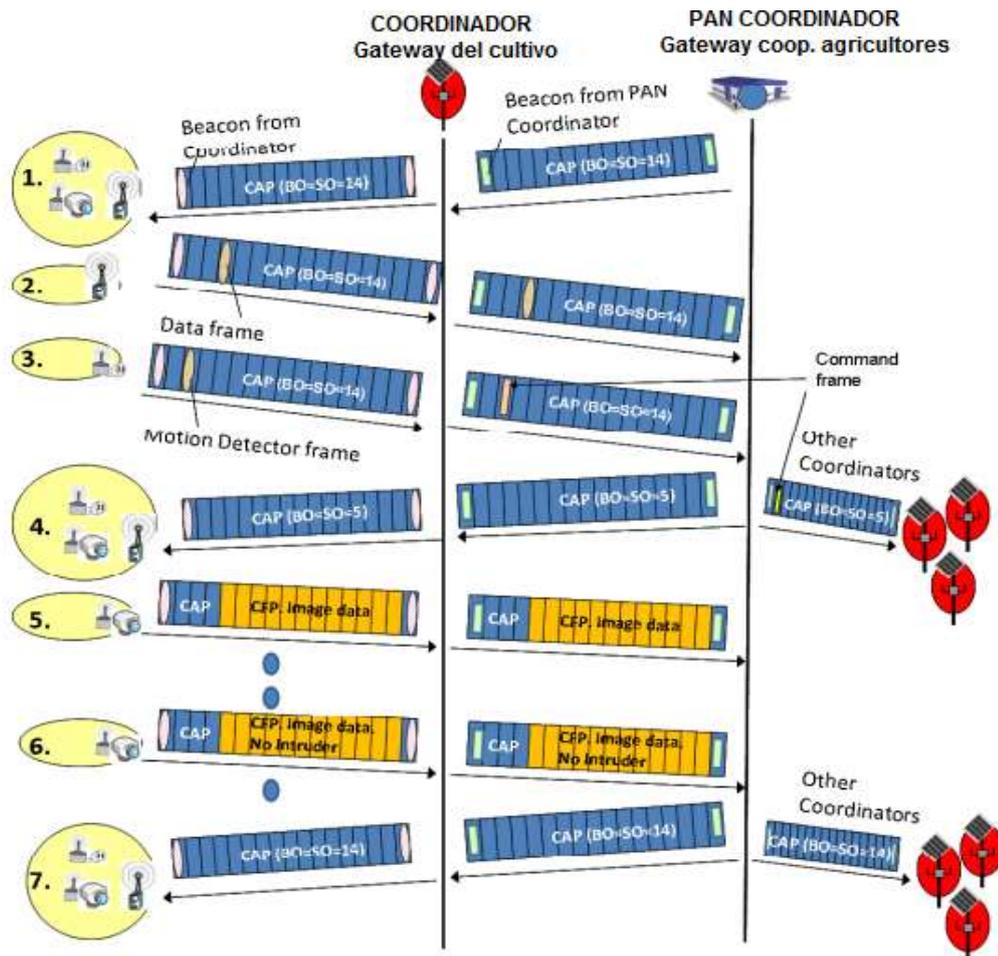


Figura 2. 3 Direccionamiento y tramas de comunicación Zigbee

Fuente: (Pawlowski, Rodríguez, Guzman, & Berenguel, 2010)

La supertrama es estudiada por el coordinador de red para transmitir ‘tramas baliza’ cada cierto intervalo (múltiples cada de 15.38 msg, hasta cada 252 seg.). Esta estructura garantiza el ancho de banda dedicado y bajo consumo. Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar punto a punto). Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red. (DomoDesk, 2011).

Las redes Zigbee pueden usar el entorno ‘con balizas’ o ‘sin balizas’. Las balizas son usadas para sincronizar los dispositivos de la red, identificando la red domótica, y describiendo la estructura de la ‘supertrama’. Los intervalos de las

balizas son determinados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15msg hasta los 4 minutos.

El modo 'sin balizas' es sencillo: se usa el acceso múltiple al sistema en una red punto a punto cercano. Funciona como una red de dos caminos, donde cada dispositivo es autónomo y puede iniciar una conversación en donde los otros pueden interferir. El dispositivo destino puede no oír la petición o el canal puede estar ocupado.

El modo 'baliza' es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Este modo permite a todos los dispositivos saber cuando pueden transmitir. Aquí, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que controla el canal y dirige las transmisiones. La principal ventaja de este método de trabajo es que se reduce el consumo de potencia. (DomoDesk, 2011).

El modo 'sin balizas', es típicamente usado en sistemas de seguridad, donde los dispositivos, por ejemplo, sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales, duermen el 99,999% del tiempo. Estos elementos 'despiertan' de manera regular para anunciar que siguen en la red. Cuando un evento tiene lugar (se detecta algo), el sensor se 'despierta' instantáneamente y transmite la alarma. El coordinador de red, alimentado de la red principal todo el tiempo, recibe el mensaje y activa la alarma respectiva.

El modo 'baliza' es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos escuchan al coordinador de red durante el 'balizamiento' (envío de mensajes a todos los dispositivos, broadcast, entre 0.015 y 252 segundos). Un dispositivo se registra para el coordinador y mira si hay mensajes para él. Si no hay mensajes, el dispositivo vuelve a 'dormir', despertando según un horario establecido por el coordinador. Una vez hecho todo el 'balizamiento' el coordinador mismo vuelve a 'dormirse'. (DomoDesk, 2011).

Técnicas que permitan que sólo se transmitan los datos necesarios y, por lo tanto, sólo se consuma la potencia necesaria son desafíos actualmente. En este trabajo de titulación, se ha simulado el WSN basado en el protocolo IEEE 802.15.4 Zigbee y su combinación con el muestreo basado en eventos en el problema de control climático del invernadero.

En la figura siguiente, se aprecia el uso de la tecnología Zigbee en un escenario de monitoreo de determinada variable de interés y que bien puede visualizarse en una pantalla, la conexión a internet y control de dichas variables de interés es catalogada como una red de sensores inalámbricos (WSN).

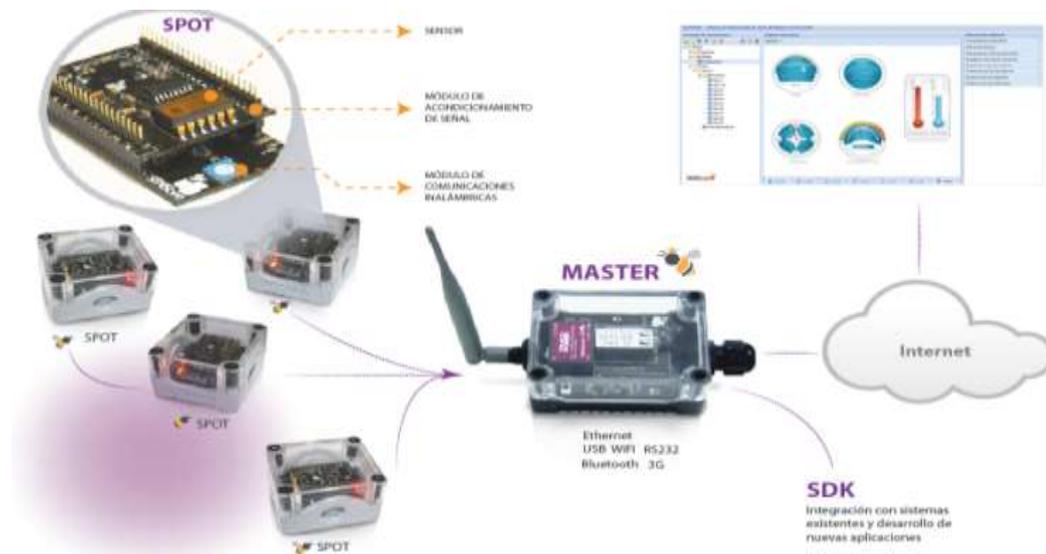


Figura 2. 1 Red Zigbee dentro de aplicación WSN

Fuente: (Cianca, 2012)

## 2.4 Sistemas operativos para nodos sensores

Los sistemas operativos para redes inalámbricas de sensores son en general menos complejos que los sistemas operativos de propósito general, ya sea por las necesidades específicas de las aplicaciones para redes de sensores, ya sea por las limitaciones en recursos en las plataformas hardware de las redes de sensores. Por ejemplo, los sistemas operativos para redes de sensores no son interactivos de la misma forma que los son los sistemas operativos para PCs. Es por esto que los sistemas operativos para redes de sensores no incluyen soporte para interfaces de usuario.

Además, las limitaciones de recursos en términos de memoria y soporte hardware de mapeo de memoria hace de algunos mecanismos como la memoria virtual bien innecesarios o bien imposibles de implementar. El hardware para redes inalámbricas de sensores no es muy distinto de los sistemas embebidos tradicionales, siendo por tanto posible la utilización sistemas operativos para sistemas embebidos tales como eCos o uC/OS. Sin embargo, este tipo de sistemas

operativos son diseñados habitualmente con propiedades de tiempo real, que los sistemas operativos diseñados específicamente para redes de sensores no ofrecen (López, 2012).

#### **2.4.1 Sistemas Operativos para red de sensores**

A continuación, se detallan algunos de los sistemas operativos más relevantes y sus particularidades:

- **TinyOS:** es un sistema operativo orientado a trabajar con redes de sensores, desarrollado en la Universidad de Berkeley. TinyOS puede ser visto como o un conjunto de programas avanzados, el cual cuenta con un amplio uso por parte de comunidades de desarrollo, dadas sus características de ser un proyecto de código abierto. (Castillo & Villreal, 2017).
- **MANTIS (Multimodal Networks In-situ Sensors):** proporciona un sistema operativo multiplataforma para redes de sensores inalámbricos. A medida que las redes de sensores acomodan tareas cada vez más complejas tales como compresión, agregación y procesamiento de señales, el multithreading preemptivo en el sensor MANTIS OS (MOS) permite a los nodos de micro sensores intercalar nativamente tareas complejas con tareas sensibles al tiempo
- **Contiki:** es un pequeño sistema operativo de código abierto, altamente portable y multitarea, desarrollado para uso para uso en pequeños sistemas, desde ordenadores de 8-bits a sistemas embebidos sobre Microcontroladores, incluyendo nodos de redes de sensores.
- **Nano-R:** es un sistema operativo completamente preventivo basado en reserva bajo tiempo real (RTOS) con soporte para redes multisalto adecuado para el uso en redes de sensores inalámbricas. Nano-RK soporta multitareas preventivas con prioridad para asegurar que los plazos de las tareas son conocidos, además de soporte de CPU, red, sensores y actuadores.
- **DuinOS:** es un sistema operativo de tiempo real, pensado para Arduino, desarrollado por RobotGroup, una institución argentina dedicada a promover y difundir la Robótica Educativa y que se dedica tanto a la investigación

como a la divulgación de temas relacionados a la enseñanza de la Robótica.

- Nut/OS: Es un pequeño sistema operativo para aplicaciones en tiempo real, que trabaja con CPUs de 8 bits.
- LiteOS: Sistema operativo desarrollado en principio para calculadoras, pero que ha sido también utilizado para redes de sensores. (Castillo & Villreal, 2017).
- MagnetOS: Es un sistema operativo distribuido para redes de sensores o adhoc, cuyo objetivo es ejecutar aplicaciones de red que requieran bajo consumo de energía, adaptativas y fáciles de implementar.
- CORMOS: (Communication Oriented Runtime System for Sensor Networks): Específico para redes de sensores inalámbricas, el cual proporciona abstracciones fáciles de usar y tratar, caracterizado por ser altamente modular con aplicaciones unificadas

#### **2.4.2 Características de TinyOS**

Castillo & Villareal (2017) concuerdan que TinyOS es un sistema operativo basado en eventos y actualmente mayormente utilizado en redes WSNs. Se distingue entre otros, ya que permite a las aplicaciones manejar el hardware directamente, no existe el concepto de kernel, no maneja memoria virtual ni memoria dinámica, se compila junto con la aplicación incluyendo sólo los módulos requeridos por la aplicación, evitando así agregar funcionalidad innecesaria al sistema operativo. Para implementar aplicaciones en TinyOS se utiliza una extensión del lenguaje C que se denomina NesC.

Entre sus características se tiene:

- Arquitectura basada en componentes
- Amplios recursos para elaborar aplicaciones
- Adaptado a los recursos limitados de las motas: energía, procesamiento, almacenamiento y ancho de banda
- Operaciones divididas en fases (Splitphase)
- Dirigido por eventos (Event Driven)

- Concurrencia de tareas y basada en eventos
- Implementación en NesC
- Los comandos los implementa el proveedor
- Los eventos son implementados por el usuario
- Un módulo implementa una interfaz
- Una configuración enlaza las interfaces internas y externas (wire)

En TinyOS los componentes se unen en tiempo de compilación, considerando las especificaciones dadas en las componentes de configuración, es decir, se unen respetando las relaciones declaradas por las interfaces. Para facilitar la composición, cada interfaz está descrita en el inicio de cada archivo de componentes. Éste entrega una lista de los comandos que acepta y los eventos que manipula, como también el conjunto de eventos que señala y los comandos que usa. (Castillo & Villreal, 2017).

Se visualiza el modelo como una caja negra, donde solo se ven entradas y salidas. Todo esto es manejado por el compilador de lenguaje NesC. Un claro ejemplo en que el compilador debe verificar múltiples uniones es que si un evento simple debe ser manejado por varias componentes, en tiempo de compilación el código será automáticamente generado para enviar el evento a tantos lugares como sea necesario

TinyOS soporta modularidad y programación basada en eventos a través del concepto de componentes.

Un componente contiene funcionalidad relacionada semánticamente, por ejemplo, para manejar una interfaz de radio o para calcular rutas. Tales componentes reúnen la información requerida de estado en un frame, el código del programa para tareas normales, “tasks”, y controladores de “events” y “commands”. (López, 2012).

Tanto los eventos como los comandos se intercambian entre los diferentes componentes. Los componentes se organizan jerárquicamente, desde los componentes a más bajo nivel cerca del hardware hasta los componentes de más alto nivel que componen en última instancia la aplicación real. Los eventos originados en el hardware pasan hacia arriba desde los componentes de bajo nivel

hasta los componentes de altos nivel; los comandos, por otro lado, se pasan desde los componentes de alto nivel hasta los componentes de bajo nivel.

Por ejemplo, un componente timer de TinyOS proporciona una versión más abstracta que un simple temporizador de hardware. Es capaz de entender distintos comandos, “stop”, “startPeriodicAt”, “startOneShotAt” entre otros. Además, puede lanzar un evento “fire” hacia otro componente, por ejemplo, un componente que lo encapsula sobre un temporizador de hardware. (López, 2012).

La característica importante por destacar es que, el paradigma basado en eventos, tanto los comandos como los controladores de eventos deben ejecutarse en un momento dado y tener previsto el fin de su ejecución, es decir, no pueden permanecer ejecutándose mucho tiempo. Se supone que deberían realizar ciclos de trabajo pequeños esporádicos. En particular, los comandos deben evitar bloquear o esperar una cantidad indeterminada de tiempo. Son una simple petición sobre la que alguna tarea de un componente más abajo en la jerarquía tiene que actuar.

De manera similar, un controlador de evento sólo abandona la información en el *frame* de su componente y planea la ejecución de una tarea para más tarde. También puede enviar comandos a otros componentes, o directamente propagar otro evento hacia arriba en la jerarquía.

El trabajo computacional real se realiza en las “tasks”. En TinyOS las tareas también deben de tener un punto inicial y final, pero la diferencia con los eventos y comandos es que estas pueden interrumpirse por los controladores. La ventaja es doble: no se necesita una administración de la pila, y las tareas son atómicas con respecto a otras tareas. Aun así, por la virtud de ser lanzadas por controladores, las tareas son virtualmente concurrentes entre ellas. (López, 2012).

El arbitraje entre tareas (varias pueden lanzarse por varios eventos y estar listas para ejecutarse) se realiza mediante un planificador FIFO simple consciente de las restricciones de consumo de potencia del nodo, que apaga el nodo cuando no hay ninguna tarea ejecutándose o esperando.

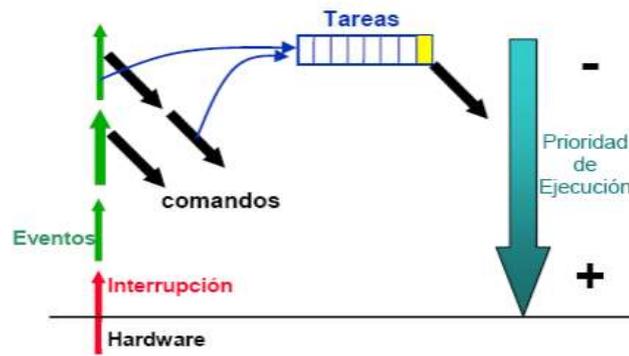


Figura 2. 4 Representación de maniobra de TinyOS

Fuente: (López, 2012)

Con las tareas y los controladores debiendo ejecutarse desde un principio y un fin, no está claro como un componente podría obtener información de otro componente sobre un comando que invocó allí. La idea es dividir tales tipos de llamadas como una petición, y la información sobre las respuestas en dos fases distintas. En la primera fase se envía el comando, mientras en la segunda se informa explícitamente sobre los resultados de la operación, entregados por un evento completamente separado del comando. Esta aproximación conocida como split-phase programming requiere que cada comando tenga un evento correspondiente que le proporcione los resultados que desea.

La aproximación permite la concurrencia bajo las limitaciones de la semántica run-to-completion. Si un comando no necesita ninguna confirmación ni ninguna información resultado de su trabajo, no se requiere que exista un evento que responda a su petición ulteriormente. (López, 2012).

Tener comandos y eventos es la única manera de interactuar entre los componentes, ya que los frames de los componentes son estructuras privadas de datos, y especialmente cuando se usa programación split-phase, un gran número de comandos y eventos se añaden incluso en un pequeño programa. Por tanto, es necesario algún tipo de abstracción para organizarlos. Un componente puede hacer llamadas a otro componente más bajo jerárquicamente, y recibir eventos de él.

Por tanto, los comandos y eventos se convierten en la interfaz de comunicación entre ambos.

En algún sentido, cada uno de los dos componentes que se comunican tiene su propia interfaz, definida por los comandos que puede ejecutar, y por los eventos que puede lanzar. (López, 2012).

El lenguaje de programación nesC formaliza esta intuición permitiendo al programador definir tipos de interfaces que definen los comandos y eventos conjuntamente. Esto permite expresar fácilmente el estilo de programación split-phase indicando en una misma interfaz cada comando con su correspondiente evento.

Los componentes pueden entonces proporcionar ciertas interfaces a sus usuarios y utilizar otras interfaces de los componentes inferiores.

Los componentes del estamento más bajo jerárquicamente y más cercanos al hardware se hacen llamar modules. Estos componentes primitivos pueden combinarse en configuraciones más grandes simplemente conectando las interfaces apropiadas. Para esta conexión, sólo los componentes que tienen los tipos de interfaces correctas pueden conectarse. El compilador se encargará de comprobar que es así. (López, 2012).

Usando esta definición de los componentes, implementación, y conceptos de conexión, TinyOS y nesC forman juntos una base potente y relativamente fácil de usar para implementar tanto funcionalidades del núcleo del sistema operativo como pilas de protocolos de comunicación y funciones a nivel de capa de aplicación.

## **2.5 Hardware para red de sensores**

A continuación, se facilita la descripción general del hardware para una aplicación de detección de incendios forestales.

El sensor o mote de Gases deberá monitorear parámetros ambientales tales como temperatura, humedad, presión atmosférica entre otros más. Un proveedor de equipamiento para este tipo de aplicación es Libelium.

Este fabricante permite la inclusión de 7 sensores de gases al mismo tiempo, la regulación de su potencia a través de un sistema de interruptores de estado sólido y

la amplificación de la señal de salida de cada uno de ellos a través de una etapa de amplificación no inversora controlada por un potenciómetro digital configurable a través del equipo Inter-Integrated Circuit Bus, I2C. Los gases que se pueden sensar son:

- Dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>
- Oxígeno molecular - O<sub>2</sub>
- Metano - CH<sub>4</sub>
- Hidrógeno molecular - H<sub>2</sub>
- Amoníaco - NH<sub>3</sub>
- Isobutano - C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>
- Etanol - CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH
- Tolueno - C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>
- Sulfuro de hidrógeno - H<sub>2</sub>S
- Dióxido de nitrógeno - NO<sub>2</sub>
- Ozono - O<sub>3</sub>
- Compuestos orgánicos volátiles (COV)

La sensibilidad del sensor puede variar cuando el dispositivo está sujeto a grandes variaciones de temperatura o humedad, por ejemplo, en condiciones exteriores. Para compensar estas variaciones, utilice las tablas y gráficos utilizados en las hojas de datos de los sensores.

En la figura 2.5 y 2.6 se muestra el nodo o mote Gases Sensor Board v.30 de Libelium,

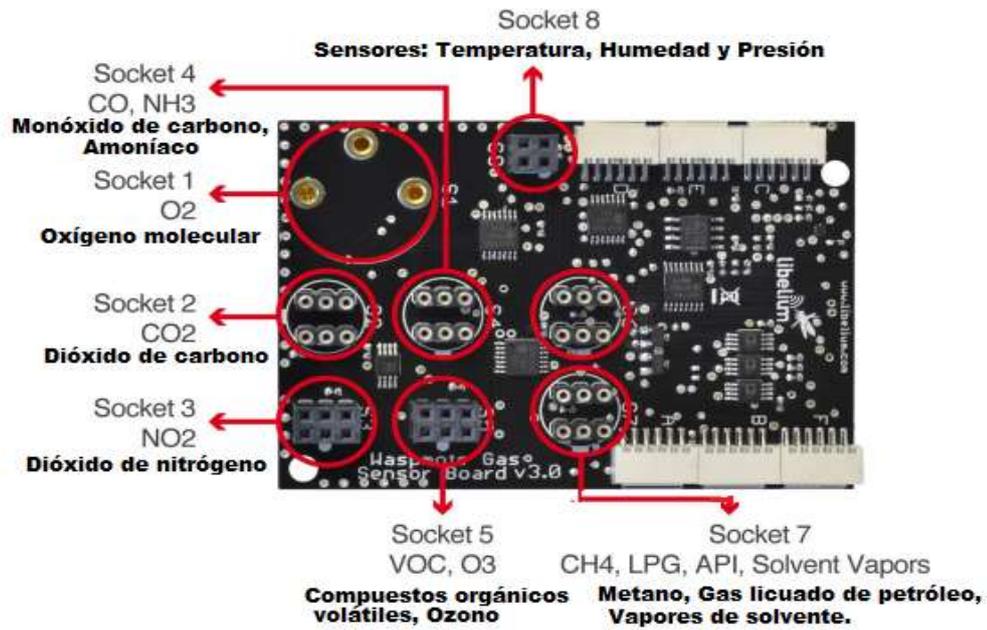


Figura 2. 5 Sócalos del mote Gases Sensor Board v.30 de Libelium,

Fuente: (Libelium, 2017)



Figura 2. 6 Mote Gases Sensor Board v.30 de Libelium,

Fuente: (Libelium, 2017)

La etapa de amplificación de cada sensor es configurable para permitir una mejor integración del sensor específico. Además, esta característica permite enfocar la precisión de Wasp mote en una región de interés. Además, es posible controlar la potencia de cada sensor por separado, ya que sus líneas de suministro de energía son independientes y pueden ser controladas por mote en tiempo real.

En la tabla 2. Se muestra el consumo en mA de los sensores del mote.

Tabla 2. 1 Consumo de los sensores del mote Gases Sensor Board v.30

	<b>CONSUMO</b>
<b>Gases Sensor Board v30</b>	8 mA
<b>O2 Sensor - SK-25</b>	0 mA
<b>CO2 Sensor - TGS4161</b>	50 mA
<b>NO2 Sensor - MiCS-2714</b>	26 mA
<b>CO Sensor - TGS2442</b>	3 mA (throughout the complete power supply cycle in 1 s)
<b>NH3 Sensor - TGS2444</b>	12 mA (throughout the complete power supply cycle in 250 ms)
<b>VOC's Sensor - MiCS-5524</b>	32 mA
<b>O3 Sensor - MiCS-2614</b>	34 mA
<b>CH4 Sensor - TGS2611</b>	61 mA
<b>Air Pollutans I Sensor - TGS2600</b>	46 mA
<b>Air Pollutans II Sensor - TGS2602</b>	61 mA
<b>Liquid Petroleum Sensor - TGS2610</b>	61 mA
<b>Solvent Vapors Sensor - TGS2620</b>	46 mA

Fuente: (Libelium, 2017)

Libelium permite modularidad entre sus mote, así existen módulos disponibles para la integración del mote, se destaca algunos de sus módulos:

- Módulos ZigBee / 802.15.4 XBee (2.4 GHz, 868 MHz, 900 MHz)
- Módulo LoRaWAN (433/868/900 MHz)
- Módulo LoRa (868/900 MHz)
- Módulo Sigfox (868/900 MHz)
- Módulo GPRS (Cuatribanda: 850/900/1800/1900 MHz)
- Módulo 3G (Dual-Band WCDMA / UMTS 900/2100 MHz y Tri-Band GS GPRS EDGE 850/900/1800 MHz).
- Módulo 4G (versiones de Europa / Brasil, América y Australia)
- Módulo WiFi
- Módulos Bluetooth: Bluetooth Low Energy y Bluetooth Pro
- Módulo NFC / RFID
- Módulo de GPS
- Módulos de sensores (placas de sensores)

### 2.5.1 Propuesta de monitoreo de incendios forestales

Una propuesta para vigilancia y monitoreo ambiental conjuntamente para la prevención de incendios como en el Bosque Protector Cerro Blanco de la cordillera Chongón-Colonche, puede implicar 3 partes principales en el sistema:

- Red de sensores inalámbricos
- Red de comunicaciones
- El Centro de Recepción

La figura 2.7 muestra el esquema de propuesta para detección temprana de fuego en bosques como la del Bosque Protector Cerro Blanco.

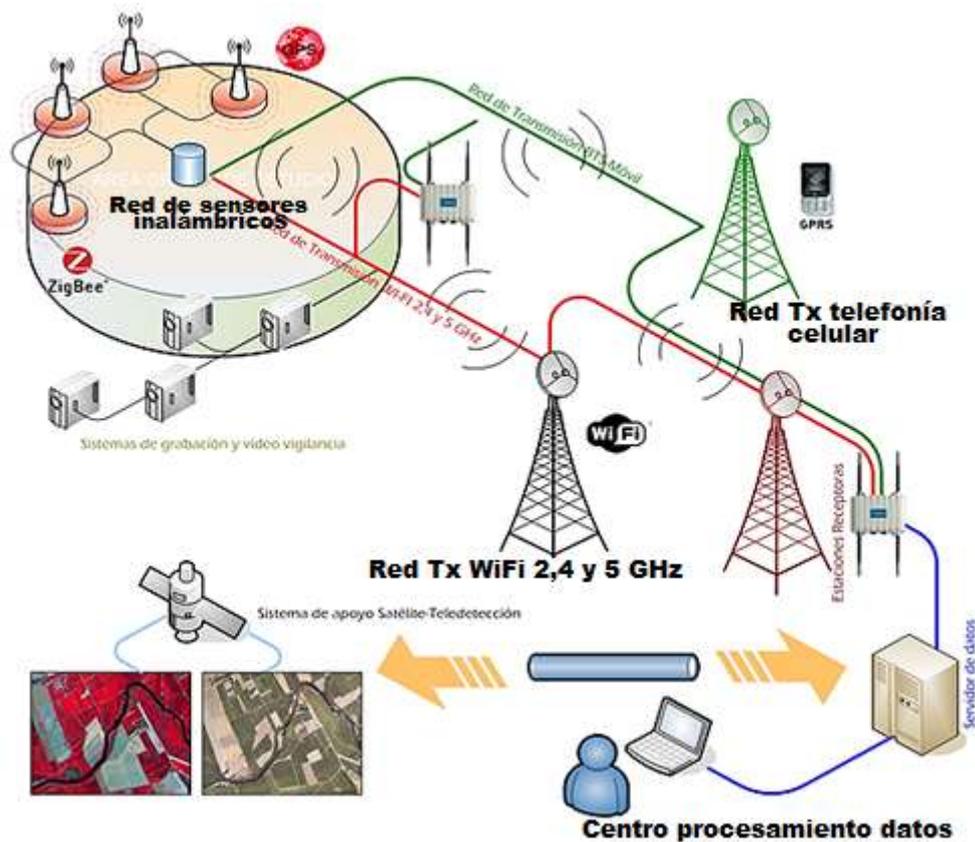


Figura 2. 7 Sistema de detección de incendios forestales

Fuente: (Libelium, 2017), modificado por el autor

Propuesta parecida se ha implementado en bosques de Europa, y según las experiencias, la mayoría de los sensores se ven afectados por 3 parámetros: humedad relativa, presión atmosférica y temperatura, sin embargo, Libelium

cuenta con sensores de precisión, para minimizar el error y obtener lecturas más precisas.

Si alguno de estos parámetros medidos supera el umbral configurado, el sistema analiza la información y reacciona enviando una alarma a los bomberos. Ellos sabrán instantáneamente que hay un incendio y dónde está con precisión, ya que cada mote puede integrar un GPS, que brinda información precisa sobre la posición y el tiempo. Los bomberos podrán saber dónde se está propagando el incendio con información en tiempo real, que es importante para saber cómo se comporta el fuego. Una de las principales características del mote es su bajo consumo de energía:

- 9 mA, modo encendido
- 62  $\mu$ A, modo de suspensión
- 0,7  $\mu$ A , modo de hibernación

El mote está durmiendo o hibernando la mayor parte del tiempo, para ahorrar batería. Después de un intervalo predefinido (programado por el usuario), el mote se despierta, lee de los sensores, implementa la comunicación inalámbrica y vuelve al modo de suspensión. Cada dispositivo está alimentado con baterías recargables y un panel solar, lo que hace que el sistema sea completamente autónomo.

Libelium ofrece varios módulos inalámbricos para la comunicación por radio, véase la tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Características técnicas de módulos motes

<b>Modelo</b>	<b>Protocolo</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>poder TX</b>	<b>Sensibilidad</b>
<b>XBee-802.15.4</b>	802.15.4	2.4 GHz	1 mW	-92 dB
<b>XBee-802.15.4-Pro</b>	802.15.4	2.4 GHz	63 mW	-100 dBm
<b>XBee-ZigBee</b>	Zigbee-Pro	2.4 GHz	2 mW	-96 dBm
<b>XBee-ZigBee-Pro</b>	Zigbee-Pro	2.4 GHz	50 mW	-102 dBm
<b>XBee-868</b>	RF	868 MHz	315 mW	-112 dBm
<b>XBee-900</b>	RF	900 MHz	50 mW	-100 dBm
<b>XBee-XSC</b>	RF	900 MHz	100 mW	-106 dBm

Fuente: (Libelium, 2017)

De modo que se puede alcanzar hasta 40 km con la condición de línea de visión (LOS) en el módulo de 868MHz. El alto rendimiento del mote hace que las lecturas sean realmente precisas y la transmisión es altamente confiable y flexible, colocando los nodos en una separación media de 1,5 km.

También es posible transmitir los datos a través de GPRS, como un módulo de radio secundario para una mejor disponibilidad y redundancia en situaciones donde es crítico asegurar la recepción del mensaje, como posibles alarmas de incendio. El módulo GPRS es cuatribanda (es compatible con cualquier proveedor de conexión celular), por lo que es capaz de funcionar en todo el mundo.

En el anexo 1 se muestra parámetros y datos de calibración de 16 sensores de gas; incluido: temperatura, humedad y presión.

### **2.5.2 Hardware Wireless HART**

HART es un protocolo de red industrial y de bajo nivel que opera a través de un lazo de corriente de 4-20mA analógica y digitalmente para dispositivos de campo principalmente inteligentes. Hoy en día, la tecnología HART es el protocolo de comunicación de dispositivos de campo más ampliamente utilizado para la inteligencia de instrumentación de proceso. A fines de la década de 1980, una compañía llamada `Rosemount Inc. ' desarrolló HART como protocolo patentado para sus dispositivos de campo, principalmente basado en el protocolo Bell-202. Alrededor de 1986, fue lanzado como un protocolo abierto que ha madurado a través de mejoras constantes.

Sin embargo, la idea revolucionaria fue combinar HART con la tecnología inalámbrica con el fin de reducir costos y llegar a lugares que eran extremadamente caros o que se pensaba que eran imposibles. Esto resultó en el nacimiento del protocolo *WirelessHART*. El protocolo HART se usa principalmente en plantas de energía, fábricas de productos químicos y las industrias de petróleo y gas. Este protocolo no tiene autenticación, autorización ni soporte de cifrado.

Se puede conectar un dispositivo compatible con IEEE 802: 15: 4 a un módulo, solo el transceptor en sí o un chip único con la RF y la MCU principal. En este apartado, se discuten algunos módulos de RF, pero se obtiene la misma

información para los transceptores. El dispositivo de RF es responsable de forma inalámbrica transmitiendo toda la información en una comunicación Wireless HART. Toda la información se envía desde la CU principal al chip de RF a través de comandos. Dichos comandos dependen del fabricante del módulo de RF. Cuando un fabricante vende estos módulos de RF, una API es obligatoria para que sea fácil y directo para los desarrolladores de reventa. Una API es un conjunto de instrucciones o comandos con los que una MCU de RF habla con otra MCU u otro componente (Novella, 2015, pág. 15). En la figura 2.8 se puede ver la comparación entre los módulos de radio WirelessHart y sus principales especificaciones.



Figura 2. 8 Comparación entre los módulos de radio WirelessHART

Fuente: (Novella, 2015, pág. 15)

El módulo de RF en un nodo inalámbrico puede aparecer de diferentes maneras: integrado en la MCU principal, en un módulo externo, conectado a la placa principal como otro componente o simplemente como una mota en sí misma con todo integrado en una MCU. La figura 2.8 muestra algunos de los módulos de RF WirelessHART y sus características clave. Asimismo, indica la arquitectura principal de los módulos de RF WirelessHART en el mercado, sus interfaces de programación y depuración, sus protecciones antimanipulación, si se mencionan en la hoja de datos y su memoria no volátil para ahorrar Datos persistentes. Todos los módulos de RF poseen un acelerador de hardware Advanced Encryption Standard (AES) -128 incorporado que se encarga de cifrar y descifrar toda la comunicación con los otros nodos de los sensores. (Novella, 2015, pág. 15)

Como se muestra en la figura 2.7, hay fabricantes específicos de estas MCU. Algunos fabricantes de chips muy conocidos son Atmel, Atmel AVR y Texas Instruments (TI). Para los módulos RF de Atmel se puede destacar:

- Transceptores Algunas referencias: AT86RF231, AT86RF232, AT86RF233 a 2: 4GHz y AT86RF233 a 700 = 800 = 900MHz.
- Módulo de RF. Al ser una combinación de MCU principal y chip de RF en un módulo adicional. Algunas referencias: AT86RF212B ZigBit, AT86RF233, ATmega256RFR2, ATxmega256A3U y Módulo AT86RF212B, Módulo ATxmega256A3U y AT86RF233.
- MCU principal y RF en el mismo chip. La arquitectura se basa en ARM Cortex M0 (RF) y AVR de 8 bits como principal. Referencias: ATSAMR21E16A, ATSAMR21E17A, ATSAMR21E18A, ATSAMR21G16A, ATSAMR21G17A, ATSAMR21G18A.

Del mismo modo, TI tiene una gran cantidad de chips diferentes según el protocolo inalámbrico, centrándose en IEEE 802: 15: 4 e WirelessHART y ZigBee. TI ofrece las siguientes referencias principales: CC252x, CC253x, CC263x y MSP430.

### **Sensores**

Cada mota o nodo inalámbrico tiene uno o varios sensores conectados. Existen diferentes tipos de sensores dependiendo de la aplicación. Principalmente, los sensores más utilizados son temperatura, presión, movimiento, densidad, distancias, ruido y vibración, entre otros. Al menos un sensor está siempre a bordo en los nodos inalámbricos. Es posible mantenerse integrado en el mismo módulo de RF, en la MCU principal o en una MCU dedicada para adquirir mediciones del entorno. Cuando se incluye un sensor en el mismo módulo de RF, normalmente se lo denomina MCU inalámbrico. Puede actuar como un nodo sensor inalámbrico por sí mismo. Dado que algunos Atmel y TI MCU ya se describieron en la sección de módulos de RF (2.2.2) y, a veces, los sensores MCU están integrados en otros chips, no se considera relevante profundizar.

#### **2.5.2.1 Memoria externa**

Muchos sensores inalámbricos están limitados por sus recursos y, por lo tanto, no son capaces de almacenar todas sus mediciones en sus memorias en chip. Aunque las MCU tienen una memoria interna de ceniza o no volátil, no es considerado una buena idea para almacenar datos en estas memorias. En primer lugar, porque los

sensores inalámbricos tienen una vida útil reducida dependiendo de sus operaciones de escritura. En segundo lugar, porque como la monitorización está guardando datos continuamente, la mayoría de los nodos de sensores inalámbricos están equipados con una memoria externa y persistente. En esta memoria, un conjunto de mediciones, se almacenan y permanecen disponibles después de cambiar el nodo inalámbrico. Normalmente estos externos los recuerdos son memorias en serie o EEPROM en serie. Dichos dispositivos de memoria se comunican con las MCU a través de las interfaces SPI o *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Tanto SPI como I2C son dos protocolos de hardware en serie basados en la comunicación Maestro-Esclavo y se consultan mediante el protocolo de respuesta de comando. (Novella, 2015, pág. 16)

#### **2.5.2.2 Fuente de alimentación**

Hay al menos tres fuentes actuales conocidas: baterías autónomas, recolección de energía con energía solar paneles y los más inusuales conectados al enchufe. Los nodos de sensores inalámbricos son conocidos por ser autoalimentados y difundirse libremente en el mundo. Este hecho recae en el uso de las baterías para mantener vivos los nodos. Dado que las MCU de baja potencia están especialmente diseñadas para reducir el consumo, las MCU están diseñadas para permanecer dormidas tanto como pueden cuando no hay comunicación RF o comandos en serie de la MCU principal. Se estima que la vida útil del nodo es de hasta 10 años, aunque existen nodos que solo viven alrededor de 5 años. Cuando las condiciones son duras, la vida útil se reduce drásticamente a aproximadamente 2 años.

#### **2.5.2.3 Modulación: Frecuencia de audio Shift Keying (AFSK)**

Como se ha mencionado anteriormente, HART opera en el circuito de corriente de 4-20mA. Además, el protocolo HART se basa en el estándar de comunicación de módem Bell-202. La modulación de datos del módem Bell-202 utiliza el AFSK para codificar datos a una velocidad de 1200 bps. Básicamente, Bell-202 se transfiere en serie datos binarios mediante el uso de la manipulación de frecuencia. El uno y el cero están codificados mediante el uso de diferentes armónicos del rango de frecuencias. Bell-202 AFSK usa un tono de 1200Hz para marcar, también

interpretado como unidad o un `1` binario, y 2200Hz para espacio interpretado como `0` en formato binario. De acuerdo con la Figura 2.9, la señal analógica se propaga con una amplitud de onda diferente, lo que da como resultado una señal digital constituida por unos y ceros. Una cosa importante de mencionar es que analógico y digital en el mismo canal, permite monitorear la Variable de Proceso (PV) de esclavos a maestros sin ninguna interrupción. Además, varias lecturas digitales pueden llevarse a cabo por segundo. Como la señal digital AFSK es de fase continua, no hay interferencia con la señal analógica 4 - 20mA y son posibles dos canales de comunicación simultáneos.

Tanto los dispositivos de mano como los dispositivos de campo tienen un módem AFSK interno que se usa para interactuar en el canal analógico, mientras que las estaciones de PC deben usar una interfaz en serie para conectar el módem AFSK.

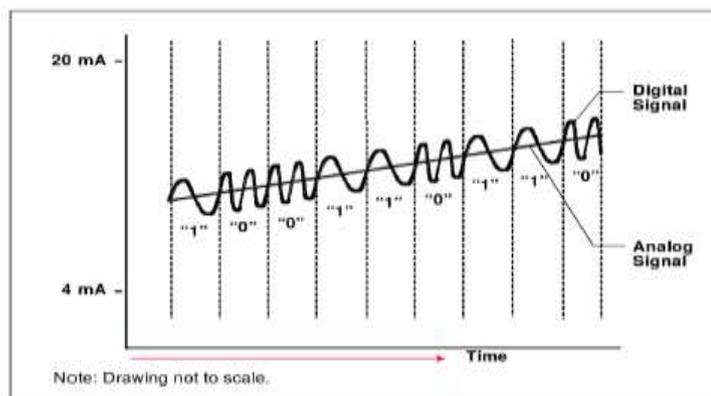


Figura 2. 9 AFSK. Comunicación analógica y digital simultánea

Fuente: (Novella, 2015, pág. 17)

#### 2.5.2.4 Modos de comunicación

En el protocolo HART se puede distinguir un par de modos de comunicación:

- **Modo Maestro-Eslavo.** Este modo es un protocolo de comunicación maestro-esclavo básico donde los dispositivos maestros, como el Sistema de control distribuido (DCS), PLC, PC o un dispositivo portátil, inician la comunicación con los esclavos (dispositivos de campo inteligente). Otra opción puede abordarse como comunicación maestro-maestro, donde hay un maestro primario, normalmente un DCS, PLC o PC, y un maestro

secundario que es una PC o un dispositivo de mano. Un ejemplo se puede ver en las Figuras 2.10 y 2.11.

- **Modo de ráfaga.** Algunos dispositivos HART también pueden admitir este modo. El modo de ráfaga acelera la comunicación. El maestro instruye y obliga al esclavo a transmitir constantemente una respuesta HART. Por lo tanto, el maestro es capaz de recibir el mensaje HART a una velocidad mayor hasta que le ordena al esclavo que deje de explotar.

En términos generales, un bucle HART es una red de comunicación en la que los dispositivos maestros y esclavos son compatibles con HART. Un lazo HART puede estar compuesto por esclavos y maestros. Para iniciar una comunicación HART, se requiere al menos un dispositivo maestro para iniciar la comunicación.

Cuando la comunicación ha comenzado, los maestros pueden enviar comandos HART a los esclavos y recibir respuestas.

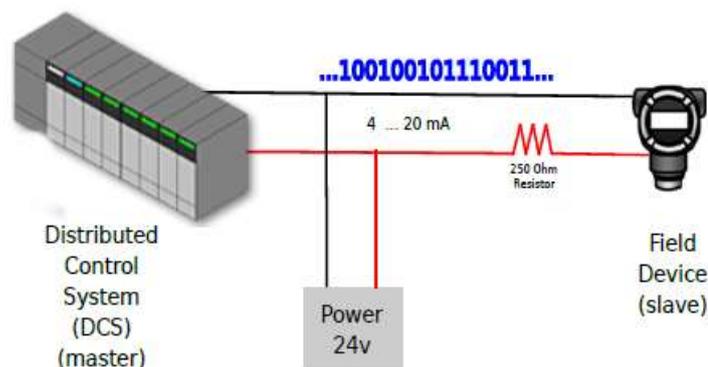


Figura 2. 10 HART Comunicación Maestro-Eslavo entre un DCS y un dispositivo de campo.

Fuente. (Novella, 2015, pág. 18)

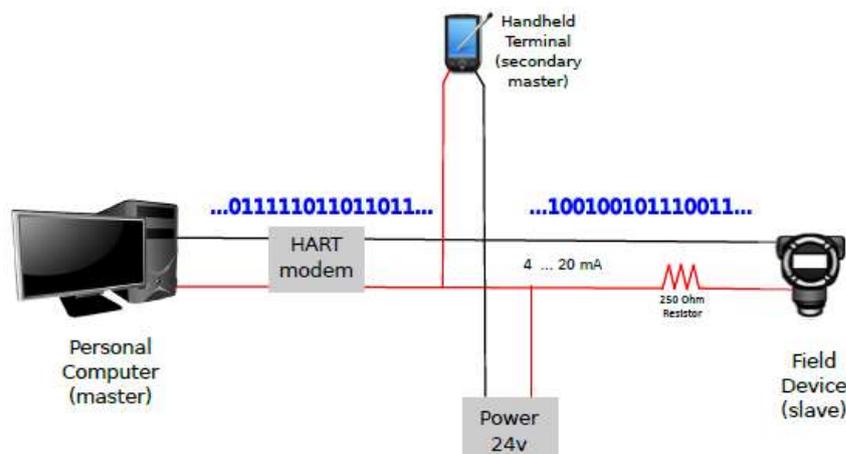


Figura 2. 11 HART-comunicación de dos maestros entre una PC, terminal de mano y dispositivo de campo.

Fuente: (Novella, 2015, pág. 18)

### 2.5.2.5 Configuraciones de red

Principalmente, las comunicaciones HART se abordan de acuerdo con las direcciones de cada dispositivo. Dicha dirección de dispositivo permite conducir tráfico y ser capaz de enrutar datos a través de él. En el protocolo HART, se puede distinguir dos tipos de configuraciones de red:

1. **Punto a punto** (analógico y digital). Esta modalidad incluye dos dispositivos, como un dispositivo de campo (esclavo) y una PC o terminal de mano (maestro). Al usar el protocolo HART, ambos canales de comunicación transmiten datos diferentes. Solo se utiliza un PV en la señal analógica 4 - 20mA. La señal digital se está comunicando con el resto de los datos en forma de PV, parámetros de configuración u otra información del dispositivo. Una condición debe ser respetada; la dirección del dispositivo del dispositivo de campo debe ser cero para poder establecer la comunicación.
2. **Multipunto** (Digital). Solo se utiliza la señal digital mientras que el analógico se ajusta a 4 mA para proporcionar un bucle de corriente. En este modo, se pueden conectar hasta 15 dispositivos en paralelo a un solo par de hilos. El host de PC, maestro en la comunicación, es capaz de asignar direcciones de dispositivo diferentes dentro del rango de 1 a 15. Las revisiones HART más nuevas permiten direcciones de hasta 63 y teniendo

cada dispositivo una dirección única. A diferencia de punto a punto, todas las direcciones de los dispositivos son > 0. (Novella, 2015, pág. 19)

### 2.5.2.6 Capas de comunicación HART

A continuación, en la tabla 2.3 se puede ver una comparación entre las 7 capas del modelo OSI y las capas de comunicación HART. Pues, en breve se detalle sobre cada capa HART para poder entender cómo funciona la misma.

Tabla 2. 3 Protocolo HART y modelo OSI.

Capas OSI	Capas HART
Aplicación	Comandos HART
Sesión de presentación	
Transporte	Comunicaciones de extremo a extremo
Red	Enrutamiento
Enlace de datos	Reglas del protocolo HART. Protocolo maestro-esclavo
Capa física	Bell 202, bus AFSK

Fuente: El autor

### 2.5.2.7 Estructura de paquetes

La estructura de un paquete HART se explica a continuación y puede tener diferentes variantes dependiendo de si es un paquete maestro o esclavo, el comando y su carga, y así sucesivamente. Primero se muestra la vista gráfica de una estructura de paquete HART, que se ve en la Tabla 2.3, y luego se da una breve explicación de cada campo en la estructura. Eventualmente, se facilita una imagen completa con la combinación del nombre del campo, su longitud y un pequeño detalle en la tabla 2.4.

Tabla 2. 4 Estructura de un paquete HART

Preámbulo	Byte de inicio	Dirección	Comando	Conteo de bytes	Estado	Carga útil	Chequeo de verificación
-----------	----------------	-----------	---------	-----------------	--------	------------	-------------------------

Fuente: El autor

- **Preámbulo.** Entre 5 y 20 bytes con el valor de `0xFF`. Sincroniza la secuencia antes de comenzar entre los participantes.

- **Byte de inicio.** Puede tener varios valores diferentes dependiendo del tipo de mensaje: maestro a esclavo, esclavo a maestro o incluso mensaje de explosión del esclavo. También contiene el formato de dirección; marco corto o largo dependiendo de la revisión HART.
- **Dirección.** Para un formato de cuadro corto: contiene un byte con un bit que sirve para distinguir entre dos maestros y otro bit para apuntar a los paquetes del modo de ráfaga. Para un formato de cuadro largo: contiene 5 bytes y el ID del dispositivo de campo se representa con 38 bits.
- **Comando.** Este campo está representado por un valor numérico de 1 byte que codifica los comandos maestros de 3 categorías: Comandos universales, de práctica común y de dispositivo específico.
- **Conteo de bytes.** Este campo indica la longitud del mensaje. Esta es la manera en que el receptor puede distinguir entre la carga útil y la suma de comprobación. La cantidad de bytes depende de la suma del estado y los bytes de la carga útil.
- **Estado.** Un par de bytes solo se incluyen en las respuestas de los esclavos y contienen estado de salud. Dichos bytes indican si la comunicación es exitosa o no. En el caso afirmativo, estos bytes se ponen a cero en los esclavos. Los maestros no usan éstos 2 bytes de estado.
- **Carga útil.** Contiene datos según el comando que se ejecutará. Podría estar vacío según el comando.
- **Chequeo de verificación.** También llamada paridad, es una operación *eXclusive OR* (XOR) que contiene todos los bytes, desde el Byte de inicio hasta el último byte de la carga útil y resulta en un byte final. (Novella, 2015, pág. 20)

Resumiendo, en la tabla 2.5 se puede observar un panorama general de cómo parece un paquete HART.

Tabla 2. 5 Análisis de un paquete HART

Nombre del campo	Longitud (bytes)	Propósito
Preámbulo	5-20	Sincronización y detección de operador
Byte de inicio	1	Especifica el número maestro
Dirección	1-5	Especifica esclavo, especifica maestro

		e indica modo de ráfaga
Comando	1	Valor numérico para el comando ejecutable
Conteo de bytes	1	Indica el tamaño del campo de datos
Estado	Maestro (0) Esclavo (2)	Ejecución y respuesta de salud
Datos (Carga útil)	0-253	Datos asociados con el comando
Chequeo de verificación	1	XOR de todos los bytes desde el Byte de inicio hasta el último byte de datos

Fuente: El autor

## 2.6 Sistema de detección de incendios basado en WSN.

En base a la literatura científica recabada, se debe dimensionar una red de sensores inalámbricos para poder monitorear con éxito un bosque y detectar incendios. Ante aquello se tomará aspectos como:

1. Eficiencia energética: los nodos de los sensores funcionan con baterías, por lo tanto, una red de sensores inalámbricos implementada para la detección de incendios debe consumir energía de manera muy eficiente. El consumo de energía también debe equilibrarse equitativamente entre los nodos.

Por lo general, el área de despliegue es muy grande y pueden necesitarse miles de nodos de sensor, por lo que reemplazar las baterías puede ser demasiado costoso, poco práctico o incluso imposible.

2. Detección temprana y localización precisa: es importante detectar un incendio forestal tan pronto como sea posible y estimar la ubicación del incendio con gran precisión. Un incendio forestal generalmente crece exponencialmente y es crucial que el fuego se detecte e interfiera en aproximadamente seis minutos para evitar que el fuego se propague a un área grande, estimando con precisión la posición del fuego (Emre, Korpeoglu, & Ulusoy, 2012). Este dato estadístico de tiempo de propagación de fuego en bosques es importante para enviar al personal de lucha contra incendios al lugar correcto en el menor tiempo posible.

3. Capacidad de predicción: Ser capaz de pronosticar o predecir la dirección y velocidad de propagación es significativo para planificar la lucha contra incendios. La precisa predicción requiere datos sensoriales precisos y en

tiempo real para llegar al centro de decisión y control desde todos los puntos del bosque, especialmente desde y alrededor de la región donde se ha producido el incendio (es decir, zonas críticas).

4. Adaptación a entornos hostiles o extremos: una red de sensores para la detección de incendios forestales funcionará normalmente en entornos hostiles y, por lo tanto, debería poder tratar y adaptarse a las duras condiciones. Debe ser capaz de recuperarse de daños en el nodo, errores de enlace, alta temperatura, humedad, presión, etc.

En el siguiente capítulo se plantea un esquema de despliegue del sensor, la arquitectura de red en árbol de clúster, como un protocolo de comunicación dentro del clúster y un protocolo de comunicación entre clústeres.

### **2.6.1 Esquema de implementación del sensor**

El esquema de despliegue del nodo del sensor puede afectar el diseño y el rendimiento de todos los aspectos del sistema. En un esquema de implementación, hay dos decisiones principales que tomar:

1. La distancia promedio entre los nodos de sensores vecinos.
2. El patrón de despliegue o distribución (aleatorio o un patrón regular)

### **2.6.2 Requerimientos de red WSN**

El requisito de consumo de energía bajo y equilibrado, la detección temprana, deseo de lograr una baja contención de los canales, cubriendo adecuadamente la región, el terreno y otros parámetros del bosque se debe tener en cuenta al tomar esas decisiones.

La distancia de despliegue promedio entre los nodos de sensores vecinos es un parámetro importante que afecta el rendimiento de una red de sensores inalámbricos desplegada para la detección de incendios. El tiempo para detectar un aumento de temperatura en un nodo debido a un incendio está relacionado con la distancia del nodo a la ubicación de ignición de fuego. Por lo tanto, para reducir el tiempo de detección de incendios esperado, se debe reducir la distancia promedio entre los nodos de sensores vecinos.

Pero esto puede contradecir con el objetivo de reducir las colisiones, que se espera que suceda más cuando una red se vuelve más densa. Por lo tanto, existe un intercambio entre la reducción del tiempo de detección de incendios y la probabilidad de colisión.

Algunos estudios sobre las características de propagación de incendios forestales muestran que el tiempo requerido para que un nodo sensor sea consciente del fuego depende también de las condiciones ambientales o atmosféricas del bosque, como el tipo de combustible, el nivel de ignición, la pendiente del lugar y la potencia del viento (REMER, 2010).

Los efectos de dichos factores ambientales en los incendios forestales se investigan en Ecuador por el Ministerio del Ambiente a través de la propuesta denominada "Sistema Nacional de Control Forestal" se registra y se trata de calcular un valor de componente de propagación de incendios (*Spread Component* SC) para un bosque, que representa la velocidad de propagación hacia adelante de un incendio en metros por minuto y que depende del modelo de combustible del bosque, la velocidad del viento y la pendiente de la zona.

De esta manera al determinar la distancia promedio apropiada entre los nodos sensores vecinos, se debe considerar un valor de importancia (I) para el bosque como parámetro. El valor I de un bosque depende de la importancia del bosque para protegerlo de los incendios. Por ejemplo, un bosque que rodea un sitio de patrimonio cultural puede considerarse más importante que un bosque que se encuentra en la cima de una montaña. El valor de importancia también depende del componente de propagación del bosque. Un bosque con una tasa de peligro de incendio más alta, es decir, con un valor SC mayor, se considera nuevamente que tiene un valor de importancia mayor.

El tiempo máximo de detección de incendios requerido (T, en segundos), la energía inicial de los nodos sensores (E, en julios) y la vida útil de la red requerida (N, en segundos) son algunos otros parámetros que pueden afectar la decisión de lo que la distancia entre los nodos de sensores vecinos debería ser. Teniendo en cuenta todos estos parámetros diferentes, se propone la siguiente fórmula

aproximada para determinar la distancia promedio  $d$  (en metros) entre los nodos del sensor vecinos:

$$d = \alpha \frac{ET}{NI^2} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde  $\alpha$  es un factor de normalización determinado empíricamente. Como se aprecia en la ecuación 2.1, se propone que la distancia promedio sea proporcional al nivel de energía inicial de los nodos ( $E$ ) y el tiempo requerido de detección de incendios ( $T$ ), y que sea inversamente proporcional a la vida útil de la red requerida ( $N$ ) y al cuadrado del valor de importancia ( $I$ ) del bosque.

$I$  es un parámetro sin unidad que puede tener un valor entre 1 y 10 (1: nada importante, 10: de máxima importancia) y se propone cuadrar el valor  $I$  para tener más efecto en el resultado en comparación con los otros factores. La unidad de  $\alpha$  es metro/Joule. Tenga en cuenta que, el valor de  $\alpha$  se encuentra experimentalmente, que no se centra en este documento.

Como se mencionó anteriormente, otro factor importante que afecta el rendimiento de un sistema WSN de detección de incendios es el patrón de despliegue de los nodos sensores. Se pueden considerar dos enfoques generales para definir el patrón de implementación: (1) implementación regular o (2) implementación aleatoria. En el caso de una implementación regular (homogénea), los nodos se implementan según un patrón regular y se tendrá una distancia casi igual entre los nodos vecinos. Por lo tanto, todos los nodos de sensor transmiten sus mensajes a distancias similares.

Esto conduce a un consumo equilibrado de energía de transmisión en toda la red. En implementación aleatoria (no homogénea), los nodos se despliegan aleatoriamente (desde un plano tal vez) sin seguir un patrón regular, por lo tanto, la distancia entre dos nodos vecinos es un valor aleatorio, que puede distribuirse uniformemente o no. En este caso, algunos nodos sensores pueden tener vecinos bastante distantes y, por lo tanto, pueden tener que transmitir a distancias más largas. Como el consumo de energía de transmisión aumenta exponencialmente con la distancia, esos nodos de sensor consumirán mucha más energía debido a las transmisiones y, por lo tanto, se agotarán antes.

La transmisión a distancias más largas para llegar a algunos vecinos también puede aumentar la interferencia en otros nodos y puede causar un aumento en la probabilidad de colisión. Además, una mayor distancia entre la ubicación de ignición y el nodo del sensor más cercano será:  $\frac{a}{\sqrt{2}}$ , donde  $a$  es la longitud lateral de los cuadrados.

En el diseño hexagonal (malla), la región se considera dividida en hexágonos. Los nodos sensores se colocan en las esquinas de los hexágonos y las ‘cabezas’ o nodos coordinadores de los grupos en los centros. En este caso, la distancia máxima entre una ubicación de ignición de incendio y el nodo de sensor más cercano será  $\frac{b}{2}$ , donde  $b$  es la distancia entre dos esquinas más alejadas de un hexágono. Los despliegues de muestra de acuerdo con los patrones cuadrados y hexagonales se muestran en las figuras 2.12 y 2.13 respectivamente.

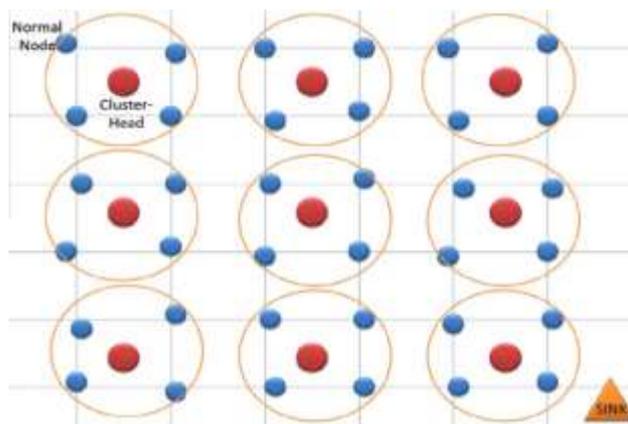


Figura 2. 12 Arquitectura de red agrupada (árbol de clústeres) de diseño con nodos coordinadores

Fuente: el autor

El diseño ‘cuadrado’ tiene menos nodos de sensor por clúster en comparación con el diseño hexagonal. Por lo tanto, cada cabezal (coordinador de la red) de clúster está menos cargado, pero para un número fijo de nodos de sensor, necesita más cabezales de clúster. Con menos nodos de sensor por clúster, la congestión se gestionará mejor en el modelo cuadrado. También es un diseño más robusto debido por tener más nodos coordinadores en el clúster. Por lo tanto, se prefiere el diseño cuadrado y se lo utilizará en simulaciones.

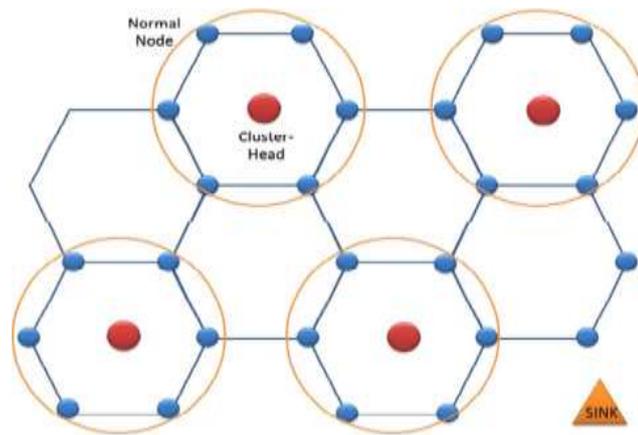


Figura 2. 13 Arquitectura de red hexagonal para WSN

Fuente: el autor

Con un despliegue irregular (aleatorio), no se puede garantizar una distancia máxima entre una ubicación de ignición de incendio y el nodo del sensor más cercano. Por lo tanto, se espera que la distancia entre una ubicación de ignición de incendio y el nodo de sensor más cercano sea mayor en la implementación aleatoria.

Aunque es posible realizar la implementación de acuerdo con un patrón regular, sin embargo, teniendo en cuenta la geografía de la región y en especial por ser cordillera (Bosque Protector Cerro Blanco), es muy posible que en algunos casos no sea posible desplegar todos los nodos de sensor con un patrón de cuadrícula regular. Habrá algunos nodos que deben desplegarse en ubicaciones distantes de otros nodos de sensor debido a la geografía del área (por ejemplo, debido a un pequeño lago dentro del bosque). Esos nodos sensores distantes tendrán que enviar sus mensajes a distancias más largas y, por lo tanto, consumirán más energía que los otros nodos. Para remediar el problema hasta cierto punto, esos nodos de sensor se pueden implementar con niveles de energía iniciales más altos si es posible.

## 2.7. Arquitectura de red y diseño de topología

El funcionamiento eficiente y efectivo de una WSN también depende de la arquitectura y la topología lógica de la red. Se detalla la arquitectura y la topología

lógica de la WSN teniendo en cuenta los objetivos de un sistema de detección de incendios y las limitaciones de los nodos de sensores inalámbricos.

Hay dos alternativas posibles para la topología de red: plana y jerárquica. En la topología plana, los nodos del sensor se ejecutan de forma totalmente distribuida con la misma responsabilidad. En una topología jerárquica agrupada, algunos nodos se designan como cabezales de clúster con más responsabilidad de controlar otros nodos miembros (ordinarios).

El uso de una topología agrupada proporciona ventajas importantes para la aplicación de detección de incendios de redes de sensores.

Por lo tanto, se plantea una topología lógica agrupada para que la red controle adecuada y adaptativamente los nodos del sensor bajo diversas condiciones. La topología agrupada tiene beneficios en términos de lograr un control efectivo de los nodos en función de las condiciones cambiantes, la reacción rápida a la amenaza de incendios y la eficiencia energética y del ancho de banda. También permite que la agregación de datos o la fusión de datos se lleven a cabo en nodos bien designados, es decir, clústeres.

De esta forma, se puede reducir el volumen de tráfico transportado dentro de la red y se puede hacer una reacción más rápida a los eventos urgentes. Esto es especialmente útil para las aplicaciones de detección de incendios, ya que la mayoría de las veces se necesita la temperatura máxima de una región en lugar de los valores de temperatura individuales de todos los nodos sensores. Además, los cabezales de racimo pueden aplicar programación inteligente y transmisiones adaptativas para reducir la carga en los nodos del sensor más cerca del nodo coordinador

En una topología agrupada, un número específico o porcentaje de nodos de sensor (donde esto depende de algunos parámetros del sistema y despliegue) formará un grupo (un clúster) y se conectará a un clúster que tendrá algunas responsabilidades adicionales. Los cabezales de racimo también pueden tener capacidades físicas superiores, como estar equipados con un módulo de GPS o tener mayor memoria, procesamiento y recursos de energía. También deberían tener la capacidad de ajustar su potencia de transmisión para transmitir a distancias más largas cuando

sea necesario. En la Fig. 2.12 se muestra una ilustración de ejemplo de la arquitectura de red agrupada o árbol de clústeres.

### **2.7.1 Protocolo de comunicación dentro del clúster con conocimiento del entorno**

En una arquitectura de red agrupada, los protocolos para la comunicación entre clústeres y la comunicación entre clústeres deben especificarse. De esta manera el protocolo de comunicación dentro del clúster (comunicación dentro de un clúster), y el protocolo de comunicación entre clústeres se describen a continuación.

Los protocolos WSN deben diseñarse para adaptarse a las condiciones ambientales actuales, como el tiempo actual o la temperatura promedio diaria actual, y también si existe una amenaza de incendio en este momento o no. En momentos en que no hay fuego y el riesgo de incendio es bastante bajo, la red debe apuntar a disminuir la sobrecarga del mensaje en toda la red y los datos deberían ser enviado al sumidero o equipo gateway, que posee mayores recursos, tanto energéticos como de hardware, que los otros nodos. Este nodo sink (sumidero) suele tener acceso a internet (si fuera necesario) y fuentes de energía ininterrumpidas. Por otro lado, los demás nodos que conforman la red son realmente limitados en lo que se refiere a, almacenamiento, potencia de cómputo y esencialmente a la capacidad de energía la cual es provista por baterías internas. (Benitez, Urdinola, Olivera, & Godoy, 2016).

Este último aspecto debe cumplir el nodo sumidero con un costo mínimo, de modo que se consuma menos energía en los nodos del sensor. Esto debe hacerse, por supuesto, sin comprometer la capacidad de detección de incendios. Sin embargo, en un posible momento de amenaza de incendio o cuando el fuego se propaga, la optimización energética será un objetivo menos crítico para la red, y reaccionar al fuego rápidamente y entregar datos para que se hundan lo más rápido posible será un problema más crítico.

Por lo tanto, los protocolos del clúster deben ser adaptables a las cambiantes condiciones ambientales y climáticas, y si existe una amenaza de incendio en este momento.

Los protocolos de comunicación de clúster son diferentes al trabajo de agrupación en la literatura, porque los protocolos de agrupamiento están diseñados específicamente para ser eficaces y eficientes para la detección y el monitoreo de incendios. El protocolo de comunicación tiene características únicas diseñadas para aplicaciones de detección de incendios, como tener mecanismos adaptativos para reaccionar a los incendios de manera rápida y con eficiencia energética.

El protocolo de comunicación dentro del clúster, que proporciona comunicación en un clúster entre los miembros del clúster y el clúster, consta de cuatro fases: fase de inicialización (que también implica definir la secuencia de envío de mensajes), fase de tiempo libre de riesgo (tiempo regular) fase de fuego-amenaza (tiempo de fuego), y fase de fuego progresado. Cada fase se implementa mediante un conjunto de mensajes intercambiados entre un clúster y sus nodos miembros. A continuación, se describe las acciones realizadas en cada fase.

Cuando arranca, los nodos de sensor comienzan en la fase de inicialización. En esta fase, los nodos miembros de un clúster se inicializan y configuran para conectarse a sus clústeres. Dado que el enfoque del trabajo no es la formación de clusters, se supone que los clusters están formados y configurados estáticamente. Se plantea un enfoque de agrupación dinámica para la detección de incendios fuera del alcance del documento y como un trabajo futuro.

Cuando un cabezal de clúster tiene todos los miembros conectados, asigna una secuencia de envío de mensajes de datos para ser seguida por los nodos miembros para coordinar el acceso al canal inalámbrico compartido y evitar colisiones. Esta secuencia (información de intervalo de tiempo) de cada miembro se envía al miembro junto con un parámetro de frecuencia (duración) que indica con qué frecuencia un nodo sensor enviará mensajes de datos a su cabecera de grupo.

Esta frecuencia es un parámetro ajustado dinámicamente que depende de la tasa de peligro de incendio actual calculada por cada cabezal de clúster. Es un parámetro dependiente de tiempo y espacio. El valor actual de la tasa de peligro de incendio en un clúster indica el riesgo de incendio en ese momento y en esa ubicación. Una tasa más alta causará un envío más frecuente de mensajes de datos desde los nodos del sensor al clúster.

Además, un cabezal de clúster envía información sobre los niveles de umbral de fuego a cada uno de sus nodos conectados. Usando estos umbrales, los nodos del sensor pueden determinar el nivel actual de riesgo de incendio. Después de que un cluster head envía toda la información de inicialización requerida a los nodos conectados, la siguiente fase comienza en el clúster, que es la fase de tiempo libre de riesgo.

Los nodos están en una fase de tiempo libre de riesgo durante los momentos en que el riesgo de incendio es bajo. En esos momentos, el sistema se adapta disminuyendo su nivel de actividad, de modo que puede lograr la eficiencia energética sin comprometer la capacidad de detección de incendios. Se reduce la frecuencia del envío de datos de temperatura desde los nodos del sensor a un cabezal del clúster.

Además, en esta fase, los nodos del sensor pueden ponerse en modo de suspensión durante un tiempo para ahorrar más energía. Los nodos en un clúster pueden dormir en forma de Round Robin, de modo que se logre un consumo de energía equilibrado. Al ‘dormir’ más, la frecuencia de detección de un nodo sensor se establece para ser muy baja. El período de sueño y el nivel de actividad pueden hacerse dependientes de la ubicación, es decir, adaptables a la tasa de peligro de incendios de una región.

Cuando el nivel de temperatura o humedad excede el nivel de umbral configurado en un nodo sensor, se inicia la fase de amenaza de incendio en el nodo. En esta fase, un nodo interrumpe la secuencia normal de envío de mensajes de Round-Robin e inmediatamente envía mensajes de alarma de forma agresiva, hasta que su cabecera de clúster devuelve un mensaje.

El nodo padre-master del clúster que escucha un mensaje de alarma de uno de sus nodos conectados toma las acciones necesarias para manejar la situación de emergencia. Esto implica emitir más intervalos de tiempo al nodo que envió el mensaje de alarma. Además, además de promedio y mínimo/valores máximos de temperatura y humedad, se puede enviar más información por un cabezal de clúster para el sumidero (nodo o equipo Gateway con acceso incluso a internet) para analizar el progreso del incendio.

En la fase de disparo progresivo se ingresa cuando ya hay algunos nodos de sensor dañados debido a un incendio. Cuando un nodo de sensor ordinario ha muerto debido a un incendio, este puede ser detectado por el cabezal del clúster y se pueden tomar las medidas apropiadas. Lo que es más grave es la muerte de una cabeza de racimo.

En esta fase, la red hace frente a este tipo de situaciones. El sistema debe estar preparado para el incidente en el que una cabeza de racimo no sea capaz de realizar sus tareas críticas.

Hay dos casos a considerar: (1) una cabeza de racimo puede reconocer el peligro que enfrenta y puede tomar algunas medidas antes de volverse no funcional; (2) una cabeza de racimo muere repentinamente debido al fuego.

En el primer caso, la cabecera del cluster discierne el riesgo potencial y selecciona el nodo del sensor más adecuado como el nuevo cluster-head. El nodo de miembro más apropiado se puede seleccionar utilizando una métrica risklevel ( $r$ ) que se propone:

$$r_i = \frac{T_d - t_i}{\Delta t_i} \times e_i \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Aquí,  $r_i$  es el nivel de riesgo de un nodo  $i$ ,  $T_d$  es el nivel de temperatura de muerte de los nodos regulares,  $t_i$  es la temperatura actual del nodo,  $\Delta t_i$  es el cambio en la temperatura del nodo en el último período, y  $e_i$  es el nivel de energía restante del nodo.

En el segundo caso, una cabeza de racimo puede morir de repente debido a un aumento de temperatura muy rápido o un incidente meteorológico como un rayo.

Para hacer frente a este caso, al comienzo de la fase de amenaza de incendio, un cabezal de clúster envía un mensaje de información de clúster a sus nodos miembros para que también se replique información importante sobre el clúster en los nodos ordinarios. Luego, cuando una cabeza de racimo repentinamente muere, los nodos ordinarios detectan esto al utilizar la falta de mensajes de respuesta (en respuesta a los mensajes de información regulares) enviados desde la cabecera del clúster.

El primer nodo del sensor que detecta la falla del cabezal del clúster informa a todos los otros nodos del clúster sobre la situación. Luego, los nodos intercambian algunos valores de parámetros entre ellos (como los niveles de energía restantes) para tomar una decisión sobre la próxima cabecera de grupo y usan la métrica definida en la ecuación 2.2, para decidir sobre el nodo más elegible para ser cluster-head.

El nodo más elegible se selecciona a sí mismo como el nuevo coordinador del clúster e informa a los otros nodos sobre la selección

### **Protocolo de comunicación entre clústeres con conocimiento del entorno**

El protocolo de comunicación entre clusters (es decir, comunicación de nivel de cabecera de clúster) se utiliza para transportar mensajes de datos obtenidos en los cabezales de clúster al nodo sumidero mediante el reenvío multisalto. El protocolo tiene dos objetivos principales: equilibrar el consumo de energía entre las cabeceras del clúster y reenviar los mensajes críticos al nodo receptor lo antes posible. El esquema consta de tres fases: fase de inicialización, fase de tiempo libre de riesgo y fase de amenaza de incendio.

En la fase de inicialización, los coordinadores de grupo primero determinan las rutas (de enrutamiento) que los conectarán al nodo receptor. Luego, se crea una tabla de tiempos de reenvío de mensajes (cronograma de transmisión) utilizando estas rutas. La tabla proporciona el tiempo cuando cada coordinador de grupo enviará sus datos agregados a la siguiente cabecera de grupo (ascendente). Hasta ese momento, un cabezal de clúster puede recopilar datos de los cabezales de clúster descendentes (secundarios). Es posible que, en un momento dado, más de un cluster-head pueda transmitir sus datos a su siguiente cluster-head.

De esta forma, se tiene concurrencia en la red para transportar datos hacia el nodo receptor, lo que reduce el tiempo total requerido en una ronda para recopilar todos los datos. Hay varias formas de determinar las rutas de ruta y el tiempo programado. Se puede usar uno de estos esquemas propuestos en la literatura. Aquí no se considera un algoritmo específico. Al finalizar la inicialización, la red entra en la fase de tiempo libre de riesgo.

En la fase de tiempo libre de riesgo, el funcionamiento de un clúster es bastante simple. Recibe datos de los nodos miembros y otros cabezales de clúster, realiza el procesamiento y la agregación, y envía datos al siguiente nodo ascendente en el camino al nodo receptor. Para la detección de incendios, el nivel máximo de la temperatura y el nivel mínimo de humedad son indicadores importantes de un posible incendio forestal, por lo tanto, la agregación se realiza utilizando las funciones; máximo. y mínimo.

De vez en cuando, sin embargo, los valores de temperatura instantánea y los valores de temperatura mínima / máxima también pueden enviarse por un cabezal de clúster al nodo receptor para que el centro pueda generar un mapa de temperatura del bosque.

Cuando un cabezal de clúster recibe un mensaje de alarma de uno de sus nodos conectados, entra en la fase de amenaza de incendio. En esta fase, un cabezal de clúster intenta entregar dicho mensaje de alarma al nodo receptor tan pronto como sea posible, si es el primer cabezal de clúster que detecta la ocurrencia del incendio. Además, informa a todos los coordinadores de grupo sobre la amenaza de incendio. Esto se puede lograr mediante una transmisión en toda la red.

Un cabezal de clúster evalúa continuamente el nivel local de amenaza de incendio mediante el control de los valores detectados que recibe de los miembros del clúster.

Además, puede recibir un mensaje de amenaza de fuego de difusión (global) desde los otros nodos de cabecera de clúster. El coordinador de clúster puede comparar el nivel de amenaza local con el nivel de amenaza global y ajustar la prioridad de sus mensajes. La prioridad también depende de cómo el valor de amenaza local está cambiando con el tiempo.

En el siguiente capítulo se detalla simulaciones para nodos sensores que podrían operar en la detección de fuego en bosques, al ser simulaciones se sobre entiende que cada nodo sensor estará equipado con sensores para temperaturas altas, humo CO<sub>2</sub> y otros diversos sensores que ayuden a la detección temprana de fuego en bosques.

## CAPÍTULO III: SIMULACIÓN DE RED WSN EN PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

### 3.1 Experimentos de simulación y resultados

Para evaluar la operación de una red WSN en detección de incendios se utiliza un simulador probado por expertos en el área de redes de sensores inalámbricos. En esta sección, primero se describe características del simulador y luego se muestran resultados y discusiones experimentales.

#### 3.1.1 El simulador

Se utiliza un simulador Riverbed Modeler versión académica 17.5. El entorno del simulador acepta un conjunto de parámetros de entrada del usuario antes de una ejecución de simulación. El modelador puede ser utilizado como una plataforma para desarrollar modelos de una amplia gama de Sistemas, incluyendo I + D en comunicaciones, Arquitecturas y protocolos, distribuidos, sensores inalámbricos, etc.

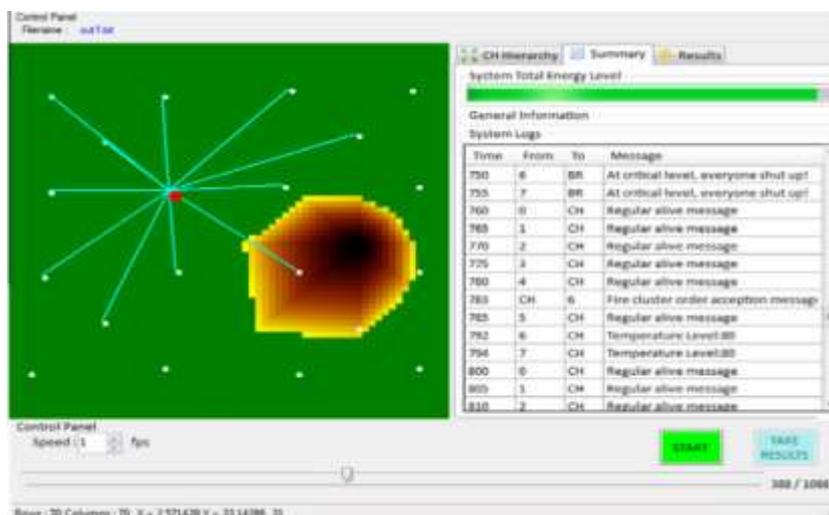


Figura 3. 1 Captura de pantalla del simulador

Fuente: el autor

Cuando se inicia una ejecución de simulación, el simulador puede simular las acciones de los nodos sensores, las operaciones de protocolo, la transferencia de datos sensoriales y eventos a un centro, la ocurrencia de un incendio y la propagación del fuego, y las operaciones de la red para detectar el incendio e

informar al centro sobre el fuego y propagación del fuego. Cuando se completa una ejecución de simulación, los resultados se producen en un archivo que se puede utilizar para evaluar los componentes y protocolos propuestos del sistema.

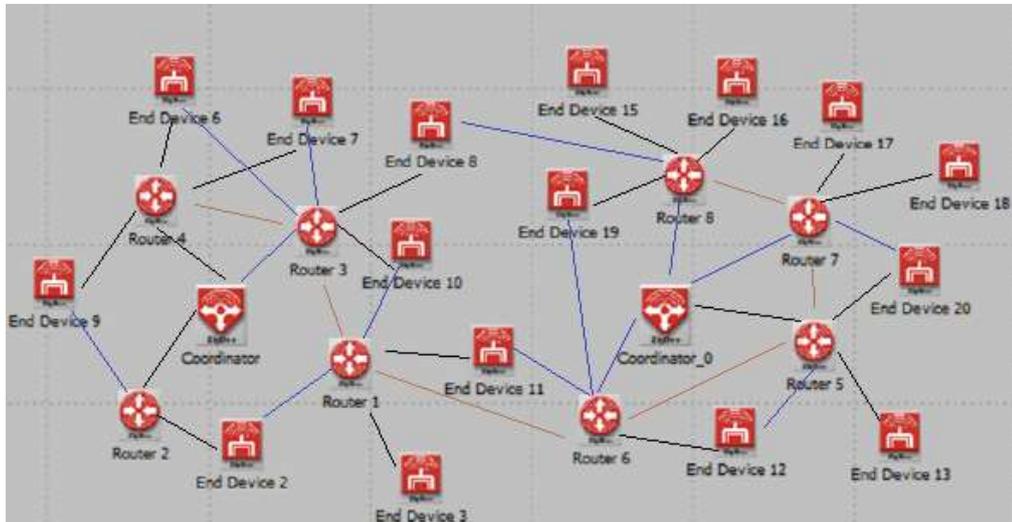


Figura 3. 2 Diseño en topología Malla con el simulador

Fuente: El autor

Esta topología tiene 51 dispositivos: un coordinador de Zigbee, 25 enrutadores de Zigbee y 25 dispositivos finales de Zigbee. Cada uno de estos enrutadores tiene diferentes números de nodos/esclavos/hijos representados por dispositivos finales Zigbee conectados a ellos como grupos. El coordinador PAN forma el primer grupo estableciéndose como el coordinador de grupo (CH).

1. FireLib: este componente utiliza y procesa el resultado de una biblioteca de simulación de incendios llamada FireLib. Así se presenta una interfaz de programación de aplicaciones (API) para el modelado de crecimiento de incendios. Firelib, la biblioteca produce como salida una tabla de tiempo de ignición (es decir, un mapa de salida) que muestra cuándo se inicia el fuego en cada celda (la región se divide en celdas).

Sin embargo, este mapa de salida solo contiene información relacionada con el tiempo y la ubicación. No proporciona información de temperatura. El trabajo del componente FireLib es calcular el nivel de temperatura de cada celda en diferentes momentos. Para este cálculo, utiliza dos parámetros adicionales: temperatura requerida para iniciar un incendio, y valor de incremento de temperatura con

respecto a un intervalo de tiempo fijo. A través de estos parámetros y el tiempo de inicio de fuego en cada celda, el componente FireLib puede producir los valores de temperatura para cada celda en función del tiempo. De esta forma, genera un mapa de temperatura variable en el tiempo para una región determinada.

2. Motor: Este es el componente central y controla las acciones de los nodos del sensor y el centro de mensajes. Su función básica es distribuir los valores necesarios entre los componentes: por ejemplo, compartir el valor de tiempo actual con el centro de mensajes y los nodos del sensor.

3. Centro de mensajes: Cuando los nodos sensores generan datos, reenvían sus mensajes destinados a uno o más destinos al centro de mensajes. El centro de mensajes hace que los nodos del sensor de destino respectivos estén al tanto de sus mensajes entrantes.

4. Nodo del sensor: El componente del nodo del sensor realiza la mayoría de las acciones importantes en el simulador siguiendo un protocolo que se puede implementar como un componente separado.

5. Estado: este componente guarda información de estado sobre los nodos del sensor. Los estados se deciden y cambian de acuerdo con el protocolo. Un estado incluye muchas variables.

6. Parámetros del simulador: hay varias entradas que deben especificarse para el motor del simulador. Algunos de estos parámetros están relacionados con la implementación, como el diseño y la distancia promedio entre los nodos del sensor. Los parámetros relacionados con las propiedades del nodo del sensor son el rango máximo de un nodo y el nivel de energía inicial. Los parámetros restantes son los valores de consumo de energía y los valores de tiempo.

### **3.2 Parámetros técnicos para la simulación**

El esquema de despliegue utilizado para colocar los nodos de sensor en un campo forestal afecta el rendimiento del sistema desde varios aspectos.

**Efecto en el consumo de energía.** Existe una opción de implementación regular o aleatoria que afecta de cerca la forma en que se consume la energía en los nodos y

en la red. Para estudiar la diferencia cuantitativamente entre estos dos enfoques principales de despliegue, se realiza experimentos simulando estos enfoques con 20 nodos sensores (figura 3.3). Todos los nodos comienzan con el mismo nivel de energía inicial. La distancia promedio entre los nodos vecinos varía entre 5 y 35 metros.

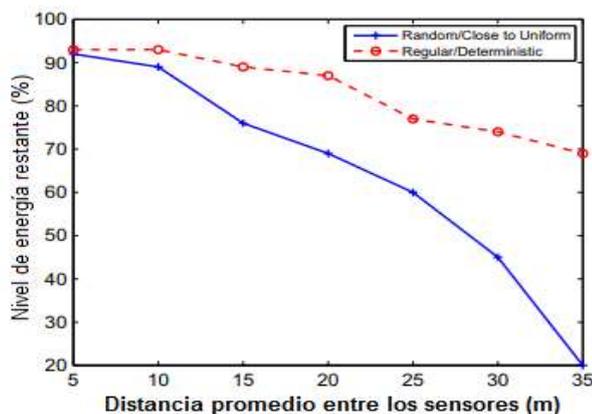


Figura 3. 3 Niveles de energía restantes de nodos desplegados regularmente y desplegados aleatoriamente

Fuente: el autor

Para probar la escalabilidad, también se experimentó con un mayor número de nodos; el experimento anterior, por ejemplo, se repite con 500 nodos y los resultados se muestran en la figura 3.4.

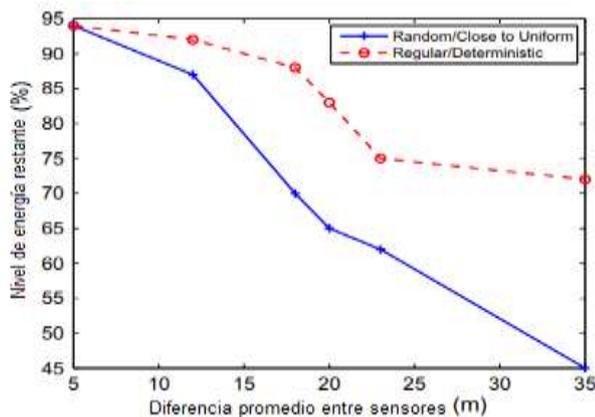


Figura 3. 4 Niveles de energía restantes de nodos desplegados regularmente y desplegados aleatoriamente. Hay 500 nodos en la red.

Fuente: el autor

Comparando las figuras 3.3 y 3.4, se puede afirmar que las tendencias son las mismas sin importar el tamaño de la red. Los resultados de simulación muestran

que el esquema de implementación regular (determinista) es preferible cuando se considera el bajo consumo de energía como se aprecia en las figuras antes dichas, que muestran la energía restante promedio en los nodos del sensor en un momento determinado después de que se inicia la simulación (inicialmente todos los nodos tienen la misma energía).

La energía restante promedio es mayor cuando los nodos de sensor se implementan usando un patrón regular. En otras palabras, la implementación regular hace que se consuma menos energía en la red en comparación con la implementación aleatoria. En el despliegue aleatorio, aunque algunos nodos de sensores estén más cerca de un clúster en comparación con el despliegue regular y, por lo tanto, consuman menos energía, generalmente habrá nodos distantes cuyo alto consumo de energía superará la ventaja obtenida de estos consumos de poca energía. Esto se debe a que el consumo de energía en un nodo es inversamente proporcional con al menos el cuadrado de la distancia hasta donde el nodo realiza las transmisiones.

Se asume que los nodos tienen transmisores que son capaces de ajuste de potencia, por lo tanto, consumen la energía suficiente para llegar a su receptor. Por lo tanto, la energía consumida se vuelve más alta en la implementación aleatoria en comparación con la implementación regular.

Además, se observa a partir de la misma figura que a medida que aumenta la distancia promedio entre los nodos sensores vecinos, también aumenta la diferencia entre el consumo de energía de los enfoques.

Otro resultado experimental que presenta la relación entre un esquema de despliegue del sensor y el consumo de energía se muestra en la figura 3.5, se analiza qué tan equilibrado está el consumo de energía entre los nodos de un clúster para ambos enfoques.

La figura muestra cómo la diferencia entre los niveles de energía restantes de dos nodos de un clúster cambia con el tiempo. Un nodo se selecciona para ser un nodo cercano, el otro como un nodo lejano. En el caso determinista, la distancia de cada nodo sensor en un clúster al cabezal del clúster es casi la misma (no exactamente igual, ya que en la práctica no es posible colocar todos los nodos del sensor en

ubicaciones exactas de esquina de la cuadrícula), y por lo tanto, consumen casi la misma cantidad de energía con cada transmisión.

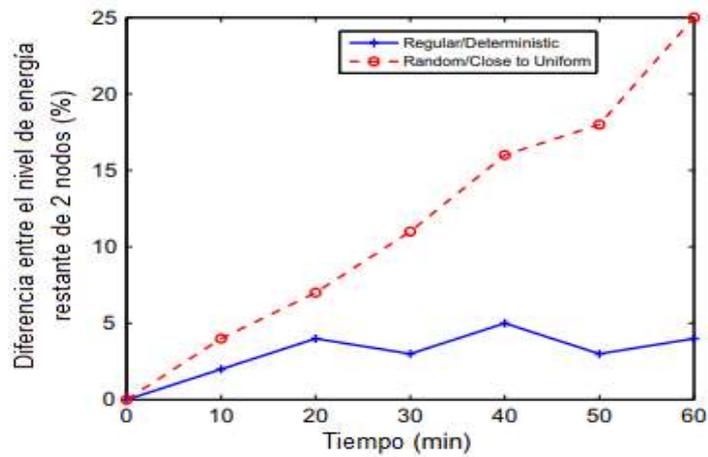


Figura 3. 5. Diferencia entre los niveles de energía de dos nodos en el mismo grupo/clúster (Hay

Fuente: el autor

En el despliegue aleatorio, por otro lado, un nodo miembro de un clúster que está muy lejos del clúster consume mucha más energía en comparación con un nodo miembro que está más cerca del clúster.

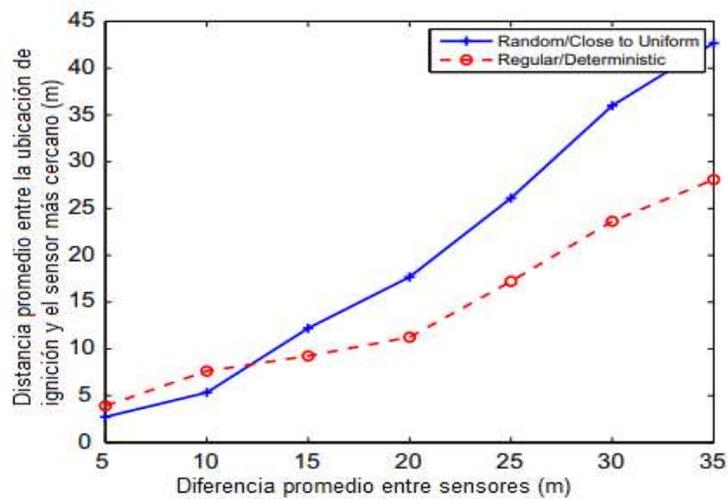


Figura 3. 6 Distancia entre ignición de fuego y sensor más cercano en esquemas de despliegue.

regular y aleatorio

Fuente: el autor

Por lo tanto, la diferencia entre los niveles de energía restantes de los nodos de un grupo aumenta con el tiempo. Como muestra la figura, el despliegue regular causa un consumo de energía más equilibrado entre los miembros de un clúster.

**Efecto en el tiempo de detección de incendios.** Cuando se considera el objetivo de detección temprana, nuevamente el esquema de despliegue regular es más exitoso como se puede ver en la figura 3.7. La figura muestra la distancia promedio entre una ubicación de ignición y un nodo sensor más cercano para varios valores de la distancia promedio de despliegue entre nodos de sensor ‘vecinos’ que variaron entre 5 y 35 m. Como muestra la figura, la distancia promedio entre una ubicación de ignición de incendio y un nodo de sensor más cercano es mayor en el caso de despliegue aleatorio.

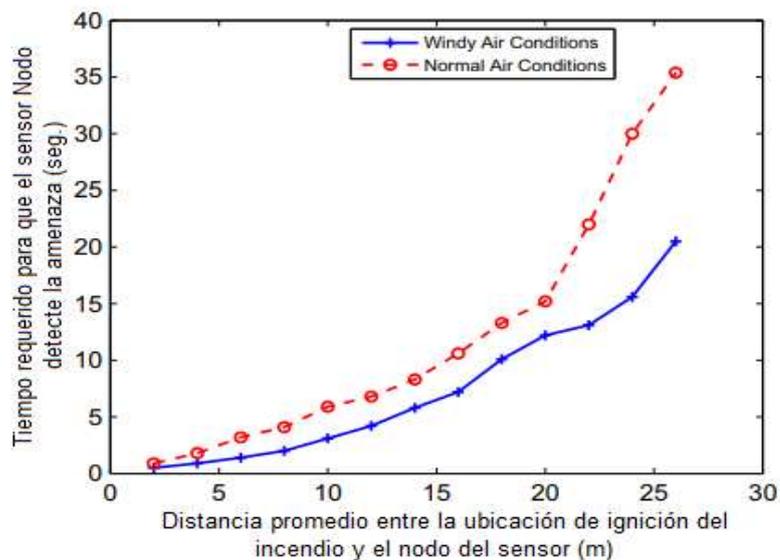


Figura 3. 7 Tiempo requerido para que los nodos sensores detecten la amenaza de incendio para varias distancias.

Fuente: el autor

Los puntos en la red para realizar procesamiento de datos, fusión de datos y para proporcionar coordinación y cooperación. Se debió escoger con una topología jerárquica y agrupada para una red de sensores para el monitoreo y la detección de incendios.

Al comparar la topología agrupada con la topología plana (topología no agrupada) en términos de volumen total de tráfico y volumen de tráfico esencial transportado en la red. Como se mencionó anteriormente, la arquitectura en clúster facilita el

procesamiento de la red y la agregación de datos, y por lo tanto, se espera que el volumen de tráfico innecesario (no esencial) se reduzca drásticamente cuando se utiliza la arquitectura en clúster. Para este propósito, se mide la proporción de mensajes esenciales (críticos) a todos los mensajes transportados en la red. Se realizan estas mediciones tanto para la topología agrupada como para la topología plana. La figura 3.8 proporciona los resultados.

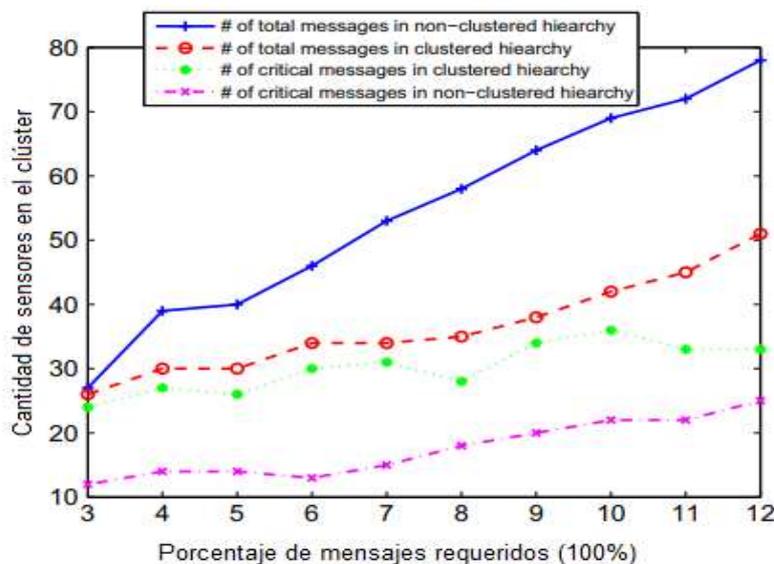


Figura 3. 8 Número de mensajes enviados al receptor

Fuente: el autor

Como se ve en la figura 3.8, se aprecia la cantidad o número de mensajes enviados al receptor cuando se aplica el cálculo local en el nivel de clúster en comparación con cuando no se realiza un cálculo local, la agrupación no solo reduce drásticamente el volumen total de tráfico transportado en la red, sino que también aumenta el porcentaje del tráfico esencial dentro del volumen total.

### 3.3 Protocolos de comunicación

Se utilizó protocolos de acuerdo al entorno del medio ambiente, es decir que esté acorde con la frecuencia con la que se detectan los datos. Tomando en cuenta la ubicación geográfica del bosque, el clima y la estación. Ahora se analiza el efecto de protocolos adecuados con el medio ambiente en el consumo de energía y el tiempo de detección de incendios.

**Efecto en el consumo de energía.** Se debe considerar las condiciones ambientales actuales (como el mes del año) al tiempo que ajusta la frecuencia de detección y comunicación de datos. Tal esquema no está ajustando el nivel de actividad en la red. La Figura 3.9 muestra el consumo de energía con el esquema propuesto y el esquema base.

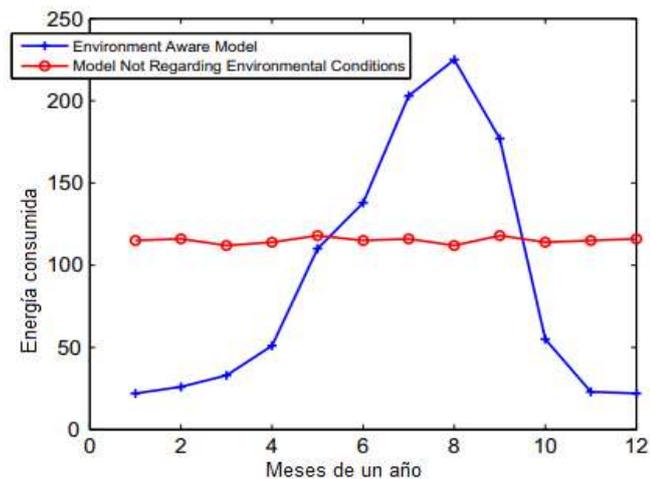


Figura 3. 9 Niveles de consumo de energía durante todo el año.

Fuente: el autor

Como muestra la figura 3.9, la energía consumida en el esquema base se mantiene en niveles similares durante todo el año. Sin embargo, en el esquema propuesto el consumo de energía cambia según la temporada. El esquema que se propone mantiene el nivel de actividad de los nodos sensores bajo en meses cuando el riesgo de incendio es bastante bajo, como los meses de la temporada de invierno. Por lo general, no se produce incendios en invierno. En esos momentos, el esquema reduce el nivel de actividad a valores muy bajos sin dañar la efectividad de la red para detectar incendios.

Esto se logra, por ejemplo, enviando mensajes informativos regulares con menos frecuencia a los coordinadores de grupo. En verano, sin embargo, el esquema mantiene el nivel de actividad bastante alto y, por lo tanto, consume más energía.

Este alto consumo de energía de las estaciones de verano se compensa con un bajo consumo de energía en invierno, como se muestra en la Figura 3.10.

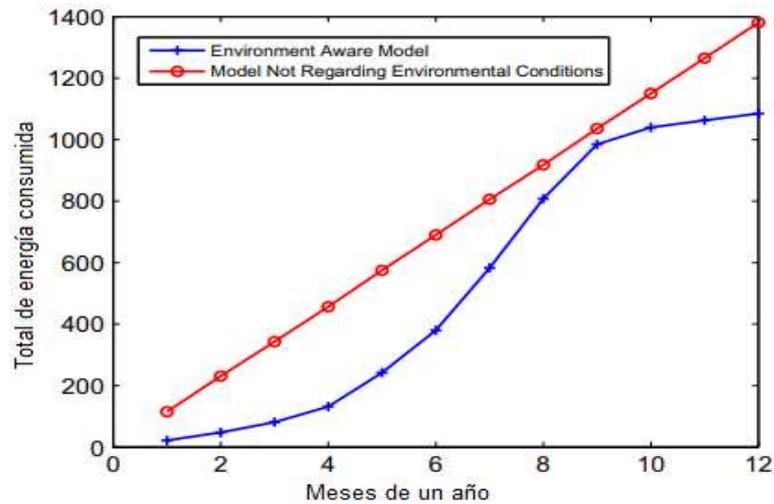


Figura 3. 10 Valor acumulado del nivel de consumo de energía de los modelos del medio ambiente a lo largo del año.

Fuente: el autor

La figura 3.10, proporciona el consumo de energía acumulada durante todo el año tanto para el esquema propuesto como para el esquema base. Como se muestra en la figura, la energía total gastada durante todo el año es menor con el enfoque propuesto, a pesar de que causa un mayor consumo de energía en los tiempos de verano.

Para evaluar el beneficio del esquema de una manera más concreta, se utiliza una métrica de consumo de energía ponderada (WE) que considera no solo el consumo de energía en un mes del año, sino también el nivel de riesgo de incendio en ese mes. Cada mes del año tiene un nivel de riesgo de incendio diferente. Así se tiene nuevo ‘peso’ de la métrica del consumo de energía en un mes con el nivel de riesgo del mes. La fórmula utilizada para calcular el nuevo valor de indicador es la siguiente:

$$WE_i = FT_i \times E_i, \quad 1 \leq i \leq 12$$

Donde  $FT_i$  es el nivel de riesgo de incendio del mes  $i$ , y  $E_i$  es la energía total consumida por los nodos del sensor en el mes  $i$ .

La figura 3.11 compara los dos esquemas usando esta métrica. En el esquema base, el valor de WE es muy alto para los meses sin riesgo. Esto es una indicación

del alto consumo innecesario de energía del esquema base en meses libres de riesgo.

Como muestra la figura, el beneficio del esquema a proponer se enfatiza más cuando se utiliza esta métrica de consumo de energía ponderada.

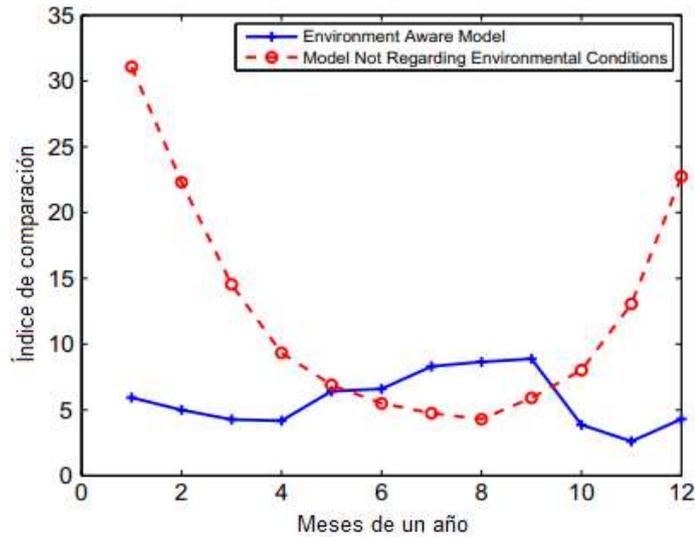


Figura 3. 11 Consumo de energía que nivela los valores del nivel de riesgo de incendio de los modelos base a lo largo del año

Fuente: el autor

**Efecto en el tiempo de detección de incendios.** En el esquema, durante un período de alto riesgo, el nivel de actividad de los nodos aumenta para detectar y reaccionar a una posible amenaza de incendio más rápidamente. La Figura 3.12, se muestra el efecto del esquema en el tiempo de detección de incendios.

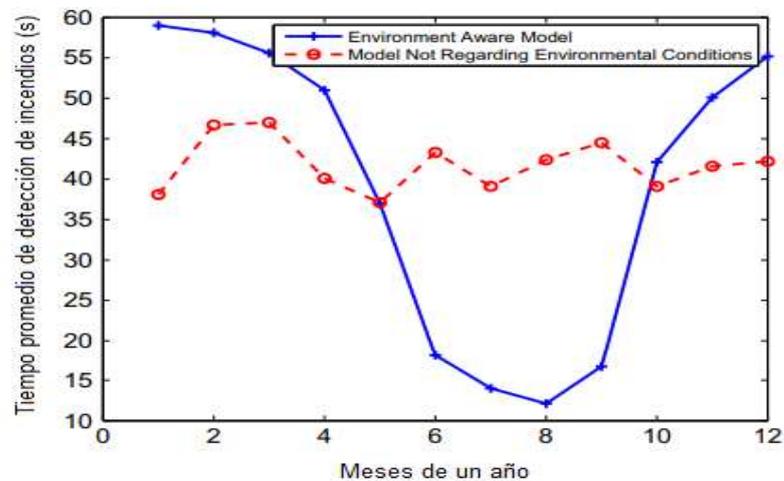


Figura 3. 12 Duraciones de detección de incendios de modelos basados en el medio ambiente durante todo el año.

Fuente: el autor

La figura traza el tiempo de detección de fuego según el mes del año para el enfoque y para el enfoque base que no utiliza el ajuste de la actividad adaptativa. La figura muestra que el enfoque base causa un rendimiento del tiempo de detección de incendios casi constante todo el año. Pero el tiempo de detección del esquema propuesto cambia a lo largo del año. Es más grande en invierno cuando el riesgo de incendio es muy bajo, pero mucho menor en los tiempos de verano cuando el riesgo de incendio es bastante alto. Por lo tanto, el enfoque puede reaccionar a una posible amenaza de incendio mucho más rápido en los tiempos de verano.

Para una evaluación más concreta del beneficio del esquema propuesto nuevamente en comparación con el esquema base, se utiliza un nuevo sistema métrico de detección de incendios ponderados (WT) que pondera el tiempo de detección de incendios en un mes con el nivel de riesgo de ese mes. A continuación, se muestra la fórmula para el cálculo de la métrica:

$$WT_i = FT_i \times T_i, \quad 1 \leq i \leq 12$$

Donde  $FT_i$  es el nivel promedio de amenaza de fuego del mes  $i$ , y  $T_i$  es el tiempo promedio de detección de incendios de los nodos regulares en el mes  $i$ . La Fig.3.13 proporciona los valores de la métrica de WT para ambos enfoques para cada mes del año.

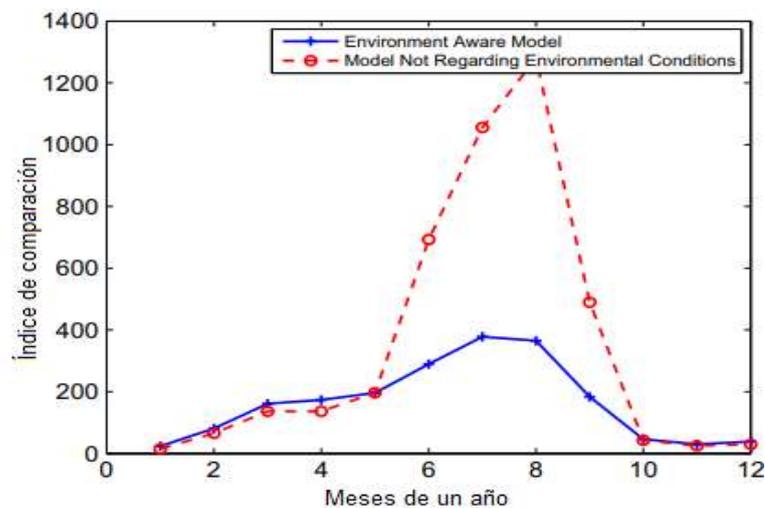


Figura 3. 13 Duración de la detección de incendios los valores de nivel de riesgo de incendio de los modelos base a lo largo del año.

Fuente: el autor

Un valor métrico más pequeño significa un mejor rendimiento. Como se puede observar en la figura, se muestra un esquema adecuado con el medio ambiente funciona mucho mejor que el esquema base.

Durante los meses sin riesgo, el valor de WT es casi el mismo para ambos esquemas. Sin embargo, en los meses de alto riesgo, el valor de esta métrica es mucho menor (es decir, mucho mejor) para el esquema.

El esquema también actúa de manera adaptativa cuando ocurre un incendio. Eso significa que es consciente de la situación. Tanto los esquemas de comunicación entre clusters como los internos comienzan a comportarse de manera diferente con una ocurrencia de incendio para reaccionar al fuego más rápidamente. Por ejemplo, el esquema de comunicación entre clusters está diseñado de tal manera que los cabezales de racimo propagan rápidamente los mensajes de alarma contra incendios al Gateway/sumidero en caso de una amenaza de incendio.

Y en el esquema de comunicación dentro del clúster, cuando un nodo sensor detecta una amenaza de incendio, inmediatamente transmite un paquete de emergencia. Por lo tanto, el coordinador de clúster se da cuenta de la amenaza rápidamente y la programación dentro del clúster se adapta en consecuencia. Ahora se compara el esquema propuesto con una versión base que no tiene esas características. Nuevamente se mide el tiempo de detección de incendios. Los resultados de medición se informan para varios valores de dos parámetros de agrupamiento: (1) número de clústeres en la red y (2) número de nodos por clúster.

La Fig. 3.14 compara el esquema adaptativo (consciente del entorno) con el esquema base (no adaptativo) para varios tamaños de red, en términos del número de clústeres. Se realizan experimentos con hasta 100 clusters. Se observa que a medida que aumenta el número de conglomerados en la red, el esquema propuesto proporciona más mejoras en el rendimiento. Eso significa que, para redes grandes, la ventaja del esquema adaptativo frente a un esquema base se pronuncia más.

Esto se debe a que las cabezas de racimo propagan rápidamente el o los mensajes de alarma fuego al nodo u equipo Gateway (sink) en caso de una amenaza de incendio.

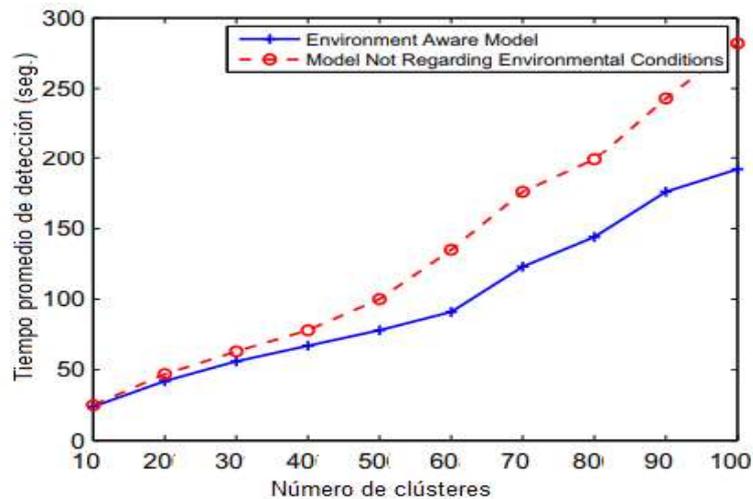


Figura 3. 14 Duración de la detección de incendios de modelos basados en el entorno y cantidad de clústeres

Fuente: el autor

Además, se observa que incluso cuando la red llega a ser bastante grande (es decir, 1000 clústeres), el tiempo de detección de un esquema adecuado con el entorno es de alrededor de 3 minutos como máximo. Esto es casi la mitad del tiempo de detección del esquema base, que es de alrededor de 6 minutos. Finalmente, la Figura 3.15 compara el esquema adaptativo con el esquema base para varios tamaños de conglomerados.

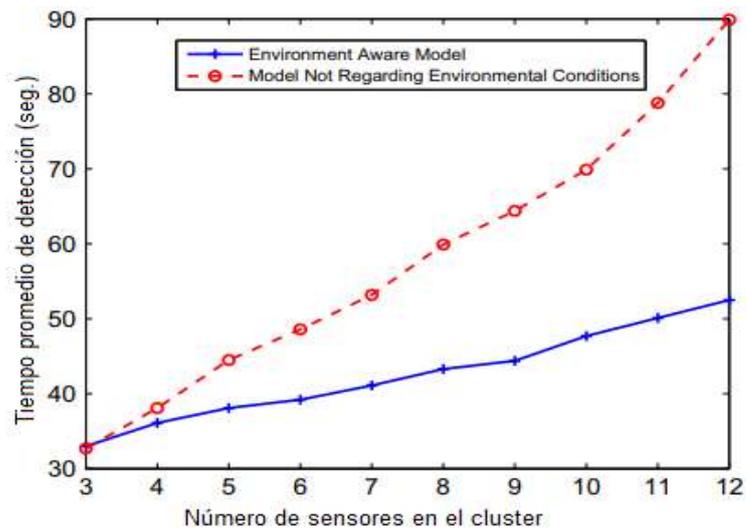


Figura 3. 15 Duraciones de detección de incendios de los modelos base y conscientes del medio ambiente varían según el número de sensores en un clúster.

Fuente: el autor

En cuanto al número de nodos para el área forestal de cerro Blanco se recomienda el equipamiento Xbee Pro ya que según el fabricante cubre aproximadamente de 178,5 m a la redonda. Por consiguiente, tomando en cuenta el bosque protector cerro Blanco que tiene una extensión de 5570 hectáreas, se deberá efectuar un cálculo de lo que será la disposición de las motas o nodos en el área forestal.

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi (178.5)[m]^2$$

$$A = 100098,21[m]^2$$

Según el área de cobertura que abarca una sola mota, se procedió a la división del área total para el área de cobertura de una sola mota, como sigue:

$$\frac{55700000 [m]^2}{100098.21 [m]^2}$$

Por consiguiente, se necesitaría alrededor de 556 nodos o motas del Xbee Pro.



Figura 3. 16 Extensión y cantidad de nodos para el Bosque Protector cerro Blanco

Fuente: el autor

De nuevo, el esquema funciona mucho mejor cuando se aumenta el tamaño del clúster. Como se mencionó anteriormente, en el esquema propuesto, en caso de un incendio, un nodo sensor transmite inmediatamente un paquete de emergencia sin esperar a que llegue su turno de acuerdo con el cronograma de transmisión de paquetes normal. Por lo tanto, el nodo coordinador o supervisor del grupo respectivo conoce la amenaza lo más rápido posible.



## CONCLUSIONES

Se ha caracterizado la composición de una red de Sensores Inalámbricos WSN mediante el estado del arte. Este tipo de redes poseen un nodo coordinador que bien puede conectarse a un nodo sumidero o equipo Gateway que permitirá conectarse al internet.

Un esquema de diseño básico de conexión en WSN que pueda supervisar o detectar incendios en bosques, está en anexo 2, la red WSN puede configurarse de manera cuadrada o malla con 150 nodos coordinadores y estos a su vez que se conecten a 4 nodos o mota tipo Xbee Zigbee Pro.

Se ha realizado simulaciones de una red WSN evaluando métricas de energía consumida y tiempo de respuesta entre nodos y su sumidero o Gateway.

El uso de una topología agrupada proporciona ventajas importantes para la aplicación de detección de incendios de redes de sensores.

Por lo tanto, se plante una topología lógica agrupada para que la red controle adecuada y adaptativamente los nodos del sensor bajo diversas condiciones. La topología agrupada tiene beneficios en términos de lograr un control efectivo de los nodos en función de las condiciones cambiantes, la reacción rápida a la amenaza de incendios y la eficiencia energética y del ancho de banda. También permite que la agregación de datos o la fusión de datos se lleven a cabo en nodos bien designados, es decir, clústeres.

En cuanto a la óptima topología de red para los sensores, se concluye que la jerarquía agrupada o malla tiene beneficios en términos de agregación de datos, capacidad de gestión, eficiencia energética y una mejor coordinación.

En el diseño hexagonal para WSN, la región se considera dividida en hexágonos, así los nodos sensores se colocan en las esquinas de los hexágonos y las ‘cabezas’ o nodos coordinadores de los grupos en los centros, pero no es robusta en comparación al diseño ‘cuadrado’ o tipo malla

El diseño ‘cuadrado’ tiene menos nodos de sensor por clúster en comparación con el diseño hexagonal. Por lo tanto, cada cabezal (coordinador de la red) de clúster está menos cargado, pero para un número fijo de nodos de sensor, necesita más

cabezales de clúster. Con menos nodos de sensor por clúster, la congestión se gestionará mejor en el modelo cuadrado. También es un diseño más robusto debido por tener más nodos coordinadores en el clúster.

Variables importantes a considerar en diseño WSN es el medio ambiente (humedad, densa vegetación etc.) y el clima dichas variables son importantes para implementar la red de sensores inalámbricos ya que en climas adversos se reduce significativamente el consumo de energía.

## **RECOMENDACIONES**

El objetivo principal es detectar una amenaza de incendio tan pronto como sea posible, sin embargo, considerar el consumo de energía de los nodos del sensor y las condiciones ambientales que pueden afectar el nivel de actividad requerido de la red.

Considerar en la detección temprana de incendios forestales la implementación de un sistema de energía eléctrica con fuente de generación no convencional en el sitio para la recarga del equipo Gateway y baterías de los nodos.

Por las difíciles condiciones ambientales en un bosque y en caso de implementación en el Cerro Blanco se debe revisar periódicamente equipamiento y verificar el funcionamiento y el rendimiento de la red.

Se recomiendan soluciones que utilizan redes inalámbricas de sensores, por otro lado, pueden recopilar otros tipos de datos sensoriales, como temperatura y humedad, desde todos los puntos de un campo de forma continua, día y noche, y proporcionar datos actualizados y precisos al centro de lucha contra incendios rápidamente

El sistema propuesto está abierto para varias mejoras.

Es recomendable la gestión local de datos y sincronización de datos en clústeres, localización de nodos mediante GPS u otras técnicas, estimación de la ubicación de ignición con o sin GPS, determinación de rutas dinámicas a nivel del cabezal de clúster.

Realizar ensayos experimentales reales para compararlos con los realizados en simulaciones.

## Referencias

- Network Simulator NS-3. (2015). *Network Simulator NS-3*. Obtenido de <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>
- Alkhatib, A. (2013). *Wireless Sensor Network for Forest Fire Detection and Decision Making*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/258360496\\_Wireless\\_Sensor\\_Network\\_for\\_Forest\\_Fire\\_Detection\\_and\\_Decision\\_Making?enrichId=rgreq-b2370ebadcd06118cfac7bc373816f21-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI1ODM2MDQ5NjtBUzo5OTIzNzAxODczNDYwN0AxNDAwNjcxMzU4MDQx&](https://www.researchgate.net/publication/258360496_Wireless_Sensor_Network_for_Forest_Fire_Detection_and_Decision_Making?enrichId=rgreq-b2370ebadcd06118cfac7bc373816f21-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI1ODM2MDQ5NjtBUzo5OTIzNzAxODczNDYwN0AxNDAwNjcxMzU4MDQx&)
- Benitez, J., Urdinola, R., Olivera, M., & Godoy, D. (2016). *PROLONGANDO VIDA UTIL DE REDES DE SENSORES MODIFICACION PROTOCOLO AODV*. Obtenido de Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y Comunicaciones (C.I.T.I.C.): [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/52932/Documento\\_completo.%20Modificacion%20protocolo%20AODV.pdf-PDFA.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/52932/Documento_completo.%20Modificacion%20protocolo%20AODV.pdf-PDFA.pdf?sequence=1)
- Castillo, & Villreal. (2017). *Sistemas Operativos para Redes de Sensores Inalámbricas: Una implementación con IPv6 en TinyOS*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/320532353\\_Sistemas\\_Operativos\\_para\\_Redde\\_de\\_Sensores\\_Inalambricas\\_Una\\_implementacion\\_con\\_IPv6\\_en\\_TinyOS](https://www.researchgate.net/publication/320532353_Sistemas_Operativos_para_Redde_de_Sensores_Inalambricas_Una_implementacion_con_IPv6_en_TinyOS)
- Cianca, K. (2012). *WSN*. Obtenido de [http://lasredesconsensores.blogspot.com/2012\\_07\\_01\\_archive.html](http://lasredesconsensores.blogspot.com/2012_07_01_archive.html)
- Dargie, W. (2012). *Dynamic Power Management en redes de sensores inalámbricos: estado del arte*. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/document/6062637/>
- DomoDesk. (2011). *A fondo Zigbee*. Obtenido de <http://www.domodesk.com/a-fondo-zigbee>

- Egea, D. (2009). *Posicionamiento con una red de sensores inalámbricos (WSN): implementación para una aplicación real*. Obtenido de [http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/97337/PFC\\_DanielEgeaRoca.pdf?sequence=1](http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/97337/PFC_DanielEgeaRoca.pdf?sequence=1)
- Emre, Y., Korpeoglu, I., & Ulusoy, Ö. (2012). *A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring*. Obtenido de Elsevier. *Computers, Environment and Urban Systems* 36 (2012) 614–625: <http://www.cs.bilkent.edu.tr/~oulusoy/CEUS12.pdf>
- García, N. (2006). *Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo*. Obtenido de <http://di002.edv.uniovi.es/~cueva/investigacion/tesis/Nestor.pdf>
- Led, S., Azpilicueta, L., & Aguirre, E. (2013). *Análisis y descripción de la prestación de servicios de HOLTIN para el monitoreo de AECG en ambientes complejos de interior*. Obtenido de <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/4/4947/htm>
- Libelium. (2017). *Gases Board v30 Guide*. Obtenido de <http://www.libelium.com/development/waspmote/documentation/gases-board-technical-guide/>
- López, J. (2012). *Estudio e Implementación de un Sistema de Seguimiento de Vehículos con una Red de Sensores Inalámbrica*. Obtenido de Repositorio digital: Universidad Politécnica de Cartagena: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2982/pfc4411.pdf?sequence=1>
- Meneses, G. (2015). *Wireless sensor networks for structural health monitoring applications*. Obtenido de [https://www.academia.edu/18124441/Redes\\_inal%C3%A1mbricas\\_de\\_sensores\\_aplicadas\\_al\\_monitoreo\\_de\\_integridad\\_estructural](https://www.academia.edu/18124441/Redes_inal%C3%A1mbricas_de_sensores_aplicadas_al_monitoreo_de_integridad_estructural)
- Novella, E. (2015). *Ingeniería inversa Hardware inalámbrico HART*. Obtenido de Instituto de Informática y Ciencias de la Información.

- NSR, National Simulation Resource. (2015). *JSim*. Obtenido de University of Washington Department of Bioengineering, provides the following tools in support of the Physiome Project:: <http://nsr.bioeng.washington.edu/jsim/>
- Pawlowski, A., Rodríguez, F., Guzman, J., & Berenguel, M. (2010). *Study of Event-Based Sampling Techniques and Their Influence on Greenhouse Climate Control with Wireless Sensors Network*. Obtenido de <http://bit.do/d8CVs>
- Pugha, A., & Sharma, V. (2015). *Una revisión sobre el enfoque estocástico para la administración de energía dinámica en redes de sensores inalámbricos*. Obtenido de Human-centric Computing and Information Sciences: <https://hcis-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s13673-015-0021-6>
- Pughat, A., & Sharma, V. (2015). *Una revisión sobre el enfoque estocástico para la gestión dinámica de energía en redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de *Comput. Inf. Sci.* , 5 ( 4 ).
- REMER. (2010). *Red Radio de Emergencia*. Obtenido de Vademecum: <http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm010.htm>
- Rodriguez, A. (2016). *Tecnología LoRa para sistemas IoT*. Obtenido de <http://www.comunicacionesinalambricashoy.com/tecnologia-lora-sistemas-iot/>
- Sensprout. (2017). *Low-cost by using smart agriculture sensor* . Obtenido de <http://sensprout.com/en/2017/02/06/749>
- TinyOS. (2013). *TOSSIM*. Obtenido de <http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TOSSIM>
- Yun, W., Weihuang , F., & Agrawal, D. (2013). *Gaussian versus distribución uniforme para la detección de intrusiones en redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* , 24 ( 2 ) pp. 342 - 355.

## ANEXO 1 Parámetros de calibración de los gases del Gases Sensor Board v.30

Parámetro	Distancia	Exactitud *
Temperatura	-40 a +85 °C	Calibrado ± 1 °C (± 0.5 °C a 25 °C)
Humedad	0 a 100% HR	Calibrado ± 3% RH (a 25 °C, rango 20 ~ 80% RH)
Presión	30 a 110 kPa	Calibrado ± 0.1 kPa (rango 0 ~ 65 °C)
Monóxido de carbono para altas concentraciones CO	0 a 500 ppm	Calibrado ± 1 ppm
Monóxido de carbono para bajas concentraciones CO	0 a 25 ppm	Calibrado ± 0.1 ppm
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	0 a 5000 ppm	Calibrado ± 50 ppm (rango 0 ~ 2500 ppm) ± 200 ppm (rango 2500 ~ 5000 ppm)
Molecular Oxygen O <sub>2</sub>	0 a 30%	Calibrado ± 0.1%
Ozono O <sub>3</sub>	0 a 18 ppm	Calibrado ± 0.2 ppm
Óxido nítrico para bajas concentraciones NO	0 a 20 ppm	Calibrado ± 0.2 ppm
Nitric Dioxide alta precisión NO <sub>2</sub>	0 a 20 ppm	Calibrado ± 0.1 ppm
Dióxido de azufre de alta precisión SO <sub>2</sub>	0 a 20 ppm	Calibrado ± 0.1 ppm
Amoníaco para bajas concentraciones NH <sub>3</sub>	0 a 100 ppm	Calibrado ± 0.5 ppm
Amoníaco para altas concentraciones NH <sub>3</sub>	0 a 500 ppm	Calibrado ± 3 ppm
Metano y otros gases combustibles CH <sub>4</sub>	0 a 100% / LEL	Calibrado ± 0.15% LEL
Hidrógeno molecular H <sub>2</sub>	0 a 1000	Calibrado ± 10 ppm
Sulfuro de hidrógeno H <sub>2</sub> S	0 a 100 ppm	Calibrado ± 0.1 ppm
Cloruro de Hidrógeno HCl	0 a 50 ppm	Calibrado ± 1 ppm
Cianuro de Hidrógeno HCN	0 a 50 ppm	Calibrado ± 0.2 ppm

<b>Phosphine PH<sub>3</sub></b>	0 a 20 ppm	Calibrado ± 0.1 ppm
<b>ETO de óxido de etileno</b>	0 a 100 ppm	Calibrado ± 1 ppm
<b>Cloro Cl<sub>2</sub></b>	0 a 50 ppm	Calibrado ± 0.1 ppm
<b>Materia de partículas - Polvo</b>	0.5 a 16 µm (16 pasos) (incluye PM1, PM2.5 y PM10)	Calibrado

\* Los valores de precisión se calcularon en condiciones promedio: 20°C/101300 Pa. Los niveles de precisión pueden diferir con los diferentes niveles de temperatura y presión, el envejecimiento y la presencia de un tercer tipo de gases que provocan sensibilidad cruzada.

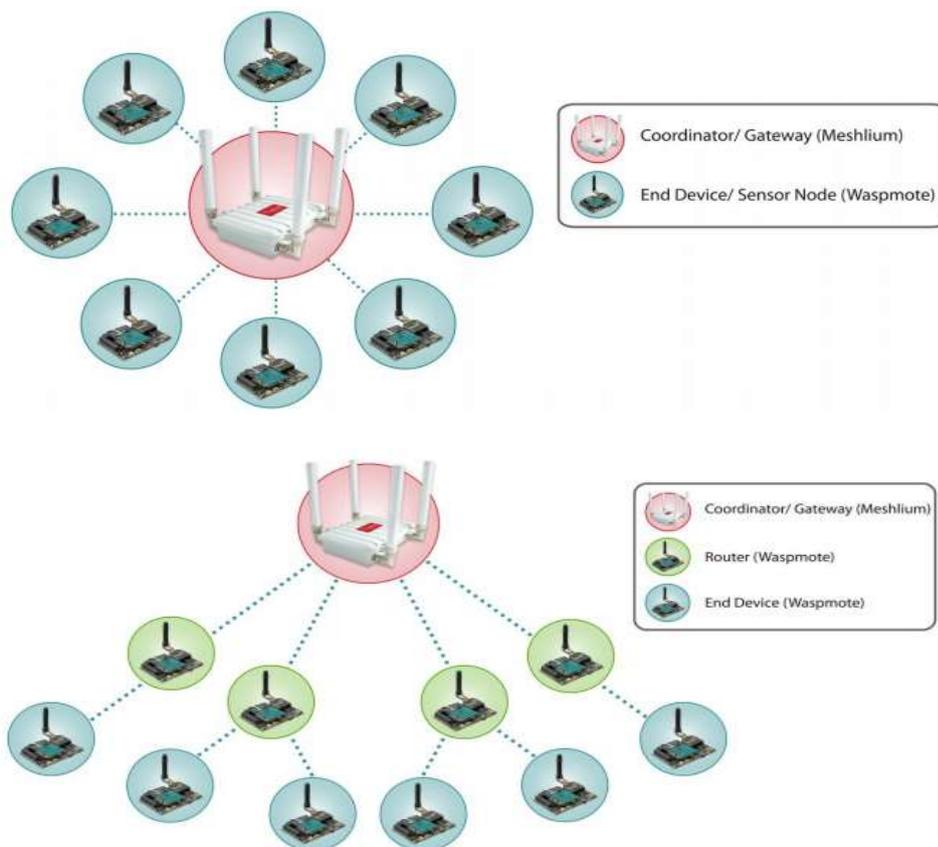
### **Parámetros técnicos del nodo o mota Xbee ZigBee Pro 2.4 GHz**

<b>Module</b>	<b>Frequency</b>	<b>Tx Power</b>	<b>Sensitivity</b>	<b>Channels</b>	<b>Distance</b>
Normal	2,40 – 2,48GHz	1mW	-92dBm	16	500m
PRO	2,40 – 2,48GHz	100mW	-100dBm	13	7000m

Con este nodo o mota, se puede realizar:

- Detección de nodos: se agregan algunos encabezados para que se puedan descubrir otros nodos dentro de la misma red. Permite un mensaje de descubrimiento de nodo que se enviará, de modo que el resto de los nodos de la red respondan indicando su información específica (Identificador de nodo, @MAC, @ 16 bits, RSSI).
- Detección de paquetes duplicados: esta funcionalidad no está establecida en el estándar y es agregada por los módulos XBee.

Las topologías en las que se pueden utilizar estos módulos son: estrella y árbol.



La topología que puede ser utilizada en detección de incendio en bosques como cerro Blanco puede ser, el tipo malla. Pues pueden establecer conexiones punto a punto con nodos hermanos mediante el uso de la dirección MAC que realiza las conexiones de múltiples saltos cuando es necesario.



## Anexo 2

Diseño esquemático de red WSN para detección de incendio en bosque Protector Cerro Blanco





**Presidencia  
de la República  
del Ecuador**



**Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes**



**SENESCYT**  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## **DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Yo, **García Troya Marvin Leonardo** con C.C: 0925629685 autor del Trabajo de Titulación: **Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la Cordillera Chongón-Colonche**, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 07 marzo del 2019

---

**García Troya Marvin Leonardo**

C.C: 0925629685

## **REPOSITARIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la Cordillera Chongón-Colonche.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Marvin Leonardo García Troya		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	María Luzmila Ruilova Aguirre		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones		
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	07 marzo del 2019	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	88
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas telemáticos, radio frecuencia, propagación		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Zigbee, WPAN, Energía consumida, Gateway, detección		
<b>RESUMEN:</b>	<p>La revolución de la tecnología WSN en los últimos años ha permitido aplicar esta tecnología con un potencial para la detección temprana de incendios forestales. Estos sensores deben ser auto organizados y seguir un algoritmo eficiente, interconectado con otras tecnologías o redes. El diseño de una red WSN ensayada en ambientes simulados es la propuesta para monitorear el bosque Protector Cerro Blanco, pero existen limitaciones, como el desvanecimiento de la señal, pues la densa vegetación produce retardo de propagación que incrementan pérdidas de la señal en el receptor de la red WSN y por ende el consumo de energía o agotamiento de batería en los nodos de la red. Se aplican métodos de investigación como la descriptiva que resume un estado de arte actualizado acerca de aplicaciones de WSN. El método sintético-analítico provee tomar en cuenta pérdidas de datos como una causa de agotamiento de batería y energía cuando una red comunica sus nodos en un ambiente con cientos de nodos sensores. Finalmente, en ambiente simulado se aplica el método empírico, pues con varias experimentaciones, se tiene resultados del rendimiento de transmisión y de sus niveles de energía en batería de sus nodos. La aportación del trabajo de titulación, indica que redes WSN podrían utilizar un protocolo bajo transmisión multi-salto durante un largo período de tiempo.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-4	E-mail: marvinlgt@hotmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Manuel Romero Paz		
	<b>Teléfono:</b> +593-		
	<b>E-mail:</b> mromeropaz@yahoo.com		