



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRONICA,

TELECOMUNICACIONES Y REDES

***“EVALUACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA
BASADA EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 PARA SISTEMAS
DE DETECCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES”***

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES

Autor:

JENNYFER KATHERINE ERAZO PEÑA

CARLOS ANDRES HERVAS PARRA

ROBAMBA-ECUADOR

-2015-

Este proyecto es fruto del esfuerzo conjunto de los que conformamos este grupo, queremos comenzar agradeciendo a Dios por darnos la sabiduría y el empuje para realizar nuestro proyecto. A nuestros padres por darnos siempre todo el apoyo, el cariño y la confianza en éste nuestro sueño, y porque no mencionar a nuestro tutor y amigos que siempre están pendientes de cada logro que hemos conseguido, así como el apoyo moral que hemos recibido por parte de ellos.

Jenn y Carlos

Dedico este trabajo a mi hermosa madre Mery, por todo el amor y apoyo que me ha brindado a lo largo de mi vida, esa mano extendida que siempre ha estado en todo momento para mí, eres el pilar de mi vida y la razón de todos mis triunfos.

A mi abuelitos Luis y Verónica por el amor y las palabras de aliento que siempre he sentido desde que era una niña, una etapa más culmina y la vida sigue como siempre, juntos.

A Cristhian por su amor, comprensión y apoyo en todos los momentos difíciles, un ciclo se cierra pero muchos comienzan y nos mantendremos tomados de la mano.

A mis amigos, personas inmejorables; todas esas noches de estudio, de risas, de hermandad han hecho que ustedes tengan un lugar importante en mi vida y en mi corazón.

GRACIAS!

Jenn

Dedico mi trabajo de investigación a toda mi familia quienes han sido el pilar fundamental para mi desarrollo personal y académico, a mis padres Aquiles y Tania los cuales siempre han estado a mi lado apoyándome con todo lo que ha sido necesario para llevar adelante mis proyectos dando todo su esfuerzo para que jamás me haya faltado algo, a mi hermano Aquiles por todos sus consejos de vida y ejemplo a seguir, a mis abuelos Alfredo Magdalena y Anita por todo el cariño, amor y apoyo que me han dado, a mi hermana Pamelita para que siga adelante con sus estudios y objetivos de vida y finalmente a todos mis demás familiares que han hecho que realmente me sienta demasiado feliz de vivir compartiendo a su lado y sentir que no pude haber tenido mejor familia por todo el amor y educación que me han entregado.

Carlos

FIRMAS RESPONSABLES Y NOTA

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Nicolay Samaniego DECANO FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	_____	_____
Ing. Franklin Moreno DIRECTOR DE ESCUELA INGENIERÍA ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES	_____	_____
Ing. Alberto Arellano DIRECTOR DE TESIS	_____	_____
Ing. Ximena Trujillo MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	_____
 DIRECTOR DEL CENTRO DE DOCUMENTACIÓN	_____	_____

NOTA DE TESIS ESCRITA: _____

RESPONSABILIDAD DEL AUTOR

Nosotros, Jennyfer Katherine Erazo Peña y Carlos Andrés Hervas Parra, somos los responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual de la misma pertenecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Jennyfer Katherine Erazo Peña

Carlos Andrés Hervas Parra

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CCA	Evaluación de Canal
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access and Collision Avoidance (Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Prevención de Colisiones)
DTH11	Digital Humidity Temperature Sensor
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection (Detección de Energía)
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GPL	General Public License
ICT	Indicador de Calidad del Enlace
IDE	Integrated Development Environment (Entorno De Desarrollo Integrado)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union (Union Internacional de Telecomunicaciones)
LM35	Sensor de Temperatura
MAC	Capa de Acceso al Medio
MQ-2	Sensor de Gas
PHY	Capa Física
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network (Red de área personal inalámbrica de bajo tráfico)
MIT	Massachusetts Institute Technology (Instituto Tecnológico de Massachusetts)
NS	Network Simulator
OSI	Open System Interconnection (Interconexión de Sistema Abierto)

RED	Random Early Detection
RF	Radiofrecuencia
RP-SMA	Reverse Polarity Sub Miniature version A
TCP IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet)
UART	Universal Asynchronous Receiver- Transmitter (Transmisor – receptor Universal Asíncrono)
UDP	User Datagram Protocol
VCC	Voltaje de Corriente Continua
WIFI	Wireless Fidelity (Fidelidad Inalámbrica)
WPAN	Wireless Personal Area Network (Red Inalambrica de Area Personal)
WLAN	Wireless Local Area Network (Red Inalambrica de Area Local)
WIMAX	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
WSN	Wireless Sensor Network (Red de Sensores Inalámbrica)
X-CTU	Software Configurator de Módulos Xbee
TCP IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet).

INDICE GENERAL

PORTADA

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

FIRMAS RESPONSABLES Y NOTA

RESPONSABILIDAD DEL AUTOR

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenidos

CAPITULO I

MARCO REFERENCIAL	18
1.1 ANTECEDENTES.....	18
1.2 JUSTIFICACION	20
1.3 OBJETIVO.....	22
1.3.1 OBJETIVOS GENERALES:.....	22
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:.....	23
1.4 HIPOTESIS.....	23
1.5 MÉTODOS Y TÉCNICAS	23
1.5.1 MÉTODOS	23
1.5.2 TÉCNICAS	24

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO	25
2.1 INTRODUCCIÓN.....	25
2.2 Red de Sensores Inalámbrica (WSN).....	26
2.2.1 Características de la WSN	28

2.2.2 Elementos de la WSN	31
2.3 Tecnología Zigbee	33
2.3.1 Descripción y Características	34
2.3.2 Estándar IEEE 802.15.4	35
2.3.2.1 Arquitectura del Estándar IEEE 802.15.4.....	36
2.3.2.2 Capa Física (PHY).....	37
2.3.2.3 Capa de Acceso al Medio (MAC).....	41
2.3.2.4 Estructura de la trama en la capa de Acceso al Medio (MAC)	44
2.3.2.5 Tipos de transmisión en Capa de Acceso al Medio (MAC)...	45
2.3.3 Módulos de Transmisión Xbee	47
2.3.3.1 Funcionamiento de Xbee con Plataforma Arduino	51
2.3.3.2 Versión Xbee Series 2	56
2.3.3.3 Versión Xbee Pro 2,4GHz.....	57
2.3.3.4 Versión Xbee Pro 900MHz	57
2.4 Modelo de propagación para la WSN.....	58
2.4.1 Modelo de Lee.....	59
2.4.2 Modelo de Weissberger	62
2.4.3 Modelo ITU Recomendación (ITU-R).....	63
2.4.4 Modelo COST235	64
2.5 Simulaciones computacionales.....	65
2.5.1 Software para simulación	66
2.5.2 Simulador NS-2, Características y Funcionamiento.....	69
2.5.3 Ejecución de Simulaciones en NS-2	71

CAPITULO III

EVALUACIÓN DE LA RED SENSORIAL INALÁMBRICA	73
3.1 INTRODUCCIÓN	73
3.2 Evaluación de Cobertura.....	74
3.2.1 Análisis de Propagación de las versiones Zigbee.....	75
3.2.1.1 Análisis de propagación versión: Xbee Serie 2.....	76
3.2.1.2 Análisis de propagación versión: Xbee Pro 2,4GHz.....	78
3.2.1.3 Análisis de propagación versión: Xbee Pro 900MHz	81
3.2.2 Resultados de análisis de propagación	84
3.3 Evaluación de eficiencia energética y tráfico.....	86
3.3.1 Creación de ambiente de simulación.....	87
3.3.2 Parámetros de simulación	87
3.3.3 Configuración de la simulación.....	90
3.3.3.1 Consumo Energético	92
3.3.3.2 Tráfico	92
3.3.4 Configuración de los nodos de la red.....	93
3.3.5 Configuración de los agentes de tráfico de la red.....	95
3.4 Simulación de las Versiones Zigbee	97
3.4.1 Simulación de la Versión Xbee Serie 2.....	97
3.4.1.1 Definición de variables	97
3.4.1.2 Obtención de resultados	98
3.4.2 Simulación de la Versión Xbee Pro 2,4GHz.....	100
3.4.2.1 Creación del escenario	100
3.4.2.2 Obtención de resultados	101
3.4.3 Simulación de la Versión Xbee Pro 900 MHz	102
3.4.3.1 Creación del escenario	102

3.4.3.2 Obtención de resultados	103
3.5 Análisis de resultados	105
3.6 Comprobación de la hipótesis	113
CAPITULO IV	
DISEÑO E IMPLEMENTACION DE LA RED INALÁMBRICA	115
4.1 Diseño de la Red de Sensores Inalámbrica	115
4.2 Diseño de elementos de la red	117
4.3 Configuración del nodo coordinador	118
4.3.1 Configuración de módulo Xbee para nodo coordinador	119
4.4 Configuración de los Nodos Sensoriales (motas)	120
4.4.1 Configuración Módulo de Sensores	122
4.4.2 Configuración del Módulo de Procesamiento (Plataforma Arduino)	125
4.4.3 Configuración de Módulo de Transmisión Plataforma Xbee. ...	132
4.5 Aplicación para Manejo de datos	136
4.5.1 Aplicación de Escritorio	137
4.6 Pruebas de funcionamiento de la WSN	139
4.6.1 Descripción de los escenarios de prueba	141
4.6.2 Pruebas de cobertura y potencia recibida	144
4.6.3 Pruebas de consumo energético	147
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFIA	
RESUMEN	
ABSTRACT	
ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla II.I. Comparación Tecnologías Inalámbricas	35
Tabla II.II. Parámetros de bandas de frecuencia 802.15.4.....	39
Tabla II.III. Frecuencias de canales IEEE 802.15.4	40
Tabla II.IV. Características Xbee Serie 2	56
Tabla II.V. Características Xbee Pro 2,4GHz	57
Tabla II.VI. Características Xbee Pro 900MHz.....	58
Tabla II.VII. Entornos para Modelo Lee.....	59
Tabla II.VIII. Comparación de modelos de propagación	65
Tabla III.IX. Ficha de datos Xbee Series 2	76
Tabla III.X. Ganancias Antenas Xbee Series 2	76
Tabla III.XI. Ficha de datos Xbee Pro 2,4GHz	79
Tabla III.XII. Ganancias Antenas Xbee Pro 2,4GHz.....	79
Tabla III.XIII. Ficha de datos Xbee Pro 900MHz	82
Tabla III.XIV. Ganancias Antenas Xbee Pro 900MHz	82
Tabla III.XV. Resultados Análisis de propagación Xbee Serie 2	85
Tabla III.XVI. Resultados Análisis de propagación Xbee Pro 2,4 GHz.....	85
Tabla III.XVII. Resultados Análisis de propagación Xbee Pro 900 MHz	86
Tabla III.XVIII. Conversión de Parámetros Xbee Series 2	97
Tabla III.XIX. Datos tráfico de paquetes Xbee Serie 2	99
Tabla III.XX. Resultados simulación Xbee Series 2	99
Tabla III.XXI. Conversión de Parámetros Xbee Pro 2,4 GHz.....	100
Tabla III.XXII. Datos tráfico de paquetes Xbee Pro 2,4Ghz	101
Tabla III.XXIII. Resultados simulación Xbee Pro 2,4GHz.....	102
Tabla III.XXIV. Conversión de Parámetros Xbee Pro 900 MHz	102
Tabla III.XXV. Datos tráfico de paquetes Xbee Pro 900MHz	104
Tabla III.XXVI. Resultados simulación Xbee Pro 900 MHz	104
Tabla III.XXVII. Resultados de Tasa de entrega de paquetes	105
Tabla III.XXVIII. Resultados de throughput	105
Tabla III.XXIX. Resultados de consumo energético	106
Tabla III.XXX. Resultados de Cobertura	106
Tabla III.XXXI. Análisis estadístico, entrega de paquetes.....	108

Tabla III.XXXII. Análisis de varianza, entrega de paquetes	108
Tabla III.XXXIII. . Análisis estadístico, throughput.....	109
Tabla III.XXXIV. Análisis de varianza, throughput.....	110
Tabla III.XXXV. Análisis estadístico, consumo energético	111
Tabla III.XXXVI. Análisis de varianza, consumo energético.....	111
Tabla III.XXXVII. Análisis estadístico, cobertura	112
Tabla III.XXXVIII. Análisis de varianza, cobertura.....	113
Tabla III.XXXIX. Resultados Totales	113
Tabla IV.XL. Modelos de versión Xbee Pro 2.4GHz	116
Tabla IV.XLI. Características Arduino UNO	125
Tabla IV.XLII. Medidas Potencia Recibida en escenarios forestales	145
Tabla IV.XLIII. Medidas Potencia Recibida en escenarios forestales 2	146
Tabla IV.XLIV. Medidas de consumo energético en nodos.....	148

INDICE DE FIGURAS

Figura I.I. Red Sensorial Inalámbrica para sistema de prevención de incendios forestales	22
Figura II.II. Red de Sensores Inalámbrica	27
Figura II.III. Nodos WSN	29
Figura II. IV. Consumo Energía de un nodo	30
Figura II.V. Topologías WSN.....	30
Figura II.VI. Elementos de la WSN.....	31
Figura II.VII. Arquitectura Nodo Sensorial.....	32
Figura II.VIII. Nodo Sensorial WSN.....	32
Figura II.IX. Arquitectura IEEE 802.15.4	36
Figura II.X. Estructura de los canales de frecuencia en IEEE 802.15.4	40
Figura II.XI. Estructura Trama PHY IEEE 802.15.4.....	41
Figura II.XII. Estructura Súper-trama IEEE 802.15.4	43
Figura II.XIII. Periodo de Contención Súper-trama IEEE 802.15.4	43
Figura II.XIV. Estructura Tramas IEEE 802.15.4.....	45
Figura II.XV. Transmisión desde Coordinador	46
Figura II.XVI. Transmisión hacia Coordinador.....	47
Figura II.XVII. Módulos Xbee y tipos de antenas	48
Figura II.XVIII. Conexiones Plataforma Xbee.....	49
Figura II.XIX. Modos de transmisión del Módulo Xbee	50
Figura II.XX. Modelos de placas de Arduino	52
Figura II.XXI. IDE Arduino.....	53
Figura XXII. Sketch Arduino	54
Figura II.XXIII. Perdidas por Obstáculos en Área Forestal.....	60
Figura II.XXIV. Características del ambiente con Follaje	61
Figura II.XXV. Perdidas por Follaje según Modelo de Lee.....	62
Figura II.XXVI. Propagación, Modelo de Weissberger	63
Figura II.XXVII. Propagación, Modelo ITU-R	64
Figura II.XXVIII. Arquitectura estructural Ns-2	70
Figura II.XXIX. Visualización del usuario a Ns-2.....	70

Figura II.XXX. Interfaz Gráfica NS-2	72
Figura III.XXXI. Escenario Área Forestal	75
Figura III.XXXII. Simulador NS-2 ejecutado en Linux.....	86
Figura III.XXXIII. Ubicación de nodos en simulador	95
Figura III.XXXIV. Simulación de tráfico NS-2	96
Figura III.XXXV. Análisis estadístico de variables.....	107
Figura IV.XXXVI. Xbee Pro 60mW Wire Antenna	116
Figura IV.XXXVII. Cobertura y topología nodos WSN.....	117
Figura IV.XXXVIII. Componentes WSN	118
Figura IV.XXXIX. Nodo Coordinador.....	119
Figura IV.XL. Configuración Nodo Coordinador	119
Figura IV.XLI. Arquitectura del Dispositivo	121
Figura IV.XLII. Tecnologías y sensores utilizados en el desarrollo del Nodo Sensorial	122
Figura IV.XLIII. Sensor DHT-11	123
Figura IV.XLIV. Sensor LM35.....	123
Figura IV.XLV. Sensor MQ-2.....	124
Figura IV.XLVI. Arduino UNO.....	126
Figura IV.XLVII. Shield Xbee.....	132
Figura IV.XLVIII. Ventana Inicial de X-CTU	133
Figura IV.XLIX. Configuración del Puerto Com.	133
Figura IV.L. Conexión Exitosa con el Modulo Xbee	134
Figura IV.LI. Modem Configuration	134
Figura IV.LII. Configuración módulo Xbee como nodo final	135
Figura IV.LIII. Dispositivo Nodo Sensorial Inalámbrico	136
Figura IV.LIV. Conexión Nodo Coordinador y Computador	137
Figura IV.LV. Ubicación Áreas Forestales para pruebas de funcionamiento WSN.....	139
Figura IV.LVI. Ubicación del nodo coordinador en el área forestal	140
Figura IV.LVII. Ubicación del nodo sensorial en el área forestal	141
Figura IV.LVIII. Escenario forestal, árboles de pino	142
Figura IV.LIX. Distribución árboles de pino	142

Figura IV.LX. Escenario forestal, árboles de eucalipto.....	143
Figura IV.LXI. Escenario forestal, área con poca vegetación.....	143
Figura IV.LXII. Analizador de Espectro	146
Figura IV.LXIII. Batería Lipo de 8VCC	147

CAPITULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES.

El término de eficiencia energética tuvo su inicio en la primera conferencia internacional de Eficiencia energética desarrollada en la segunda mitad de la década de los noventa, año 1998, en Austria (26); con el fin de empezar a promover nuevas soluciones para la creación de tecnologías que sean un aporte para a una mejor conservación del medio ambiente, es así que en el área de las telecomunicaciones, específicamente las comunicaciones inalámbricas, las tecnologías Wifi (IEEE 802.11) o Bluetooth (IEEE 802.15.1) ya no se consideran una solución óptima para cubrir todos los problemas y necesidades en torno a nuevas aplicaciones que requieren un bajo costo de implementación, menos complejidad en su infraestructura y principalmente un bajo consumo de energía, es así que bajo estas necesidades en el año 2000 se empieza a desarrollar investigaciones sobre sistemas de comunicaciones inalámbricas de bajo consumo energético y bajo costo de implementación a cargo de “Zigbee Alliance”(32), dando como resultado en el año 2003 la creación y aprobación del estándar IEEE 802.15.4 (17), para Redes Inalámbricas de baja potencia para ambientes industriales y de área personal por parte del grupo de trabajo del IEEE “*IEEE 802.15 WPAN Low Rate Alternative PHY Task Group 4a (TG4a)*” (18).

La primera versión de una tecnología inalámbrica que haga uso del estándar IEEE 802.15.4 estuvo a cargo de Zigbee Alliance la cual anunció la disponibilidad de la especificación 1.0 conocida como 802.15.4-2004 (19), sin embargo no fue hasta el 14 de diciembre de 2004 donde sus especificaciones fueron confirmadas como una tecnología para la creación de Redes Inalámbricas de Baja Transmisión de Área Personal (LR-WPAN), posteriormente el 13 de junio de 2005 Zigbee Alliance realizó una revisión de la especificación de la tecnología, para finalmente aprobar un conjunto de versiones que hagan uso del estándar IEEE 802.15.4, que van desde la creación de redes de enlace punto a punto hasta redes ad-hoc para la unión de varios nodos de transmisión, definiendo los niveles de red básicos para una red WPAN, y finalmente en el 2007 el grupo TG4a realizó una enmienda del estándar realizado en el 2006 llamado IEEE 802.15.4-2006. (20). Estos estándares definen el nivel físico y el control de acceso al medio para redes inalámbricas de área personal enfocándose en la comunicación entre dispositivos cercanos con transmisión de datos de baja velocidad para de esta manera proporcionar soluciones para sistemas inalámbricos que realicen un intercambio de información específico y requieran un consumo mínimo de energía para su funcionamiento.

Hoy en día el uso del estándar IEEE 802.15.4, como propuesta a un mejor manejo del consumo energético en una red de comunicación inalámbrica ha logrado muchos avances en el mecanismo de comunicación de diferentes aplicaciones que han surgido con el progreso de la tecnología como: domótica inalámbrica, sistemas de seguridad, controles de acceso, ahorro energético y principalmente el manejo de sensores que recolectan información sobre algún fenómeno físico. Permitiendo de esta manera poner en práctica el funcionamiento de las Redes de Sensores Inalámbricas (WSN) como la mejor solución para la creación de sistemas de adquisición y tratamiento de datos en tiempo real y de manera autónoma en diferentes puntos, es así que el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) identificó a las Redes de Sensores

Inalámbricas como una de las diez tecnologías que tienen alto impacto en el progreso tecnológico mundial (21).

La implementación de las Redes de Sensores Inalámbricas bajo el estándar 802.15.4 ha permitido generar soluciones en diversas áreas en donde dispositivos sensoriales con un mínimo consumo de recursos y energía pueden actuar como agentes de obtención de datos importantes para su análisis, es así que en el área de protección ambiental, hoy en día las redes de sensores son un aporte significativo para generar sistemas de prevención, monitoreo y detección de posibles desastres ambientales. Por ejemplo en la actualidad es posible pensar en la implementación de un conjunto de nodos o motas sensoriales inalámbricas que obtengan información sobre el estado ambiental en diferentes lugares de un área forestal para llevar un mejor control del estado climático de la misma, y en el caso de ocurrir una catástrofe como un incendio forestal el sistema sea capaz de generar mecanismos de alertas tempranas para mejorar la capacidad de actuación ante la catástrofe.

1.2 JUSTIFICACION

En los últimos años en nuestro país se ha venido desatando una problemática muy grave, los incendios forestales. *“Según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos en el año 2012 se perdió 17.600 hectáreas de bosques, páramos cultivos”* (27), afectando significativamente al Estado, la población, los ecosistemas y dentro de éstos la flora y la fauna. Las causas de los incendios forestales en nuestro país son en tan solo un 5% provocado por factores ambientales apropiados para desatar un incendio, mientras que en un 95% son de origen antrópico; debido a negligencias, desconocimiento o situaciones intencionales.

Cabe resaltar que los efectos de un incendio forestal se dan a grandes proporciones debido a que no existe un componente preventivo para atender este tipo de catástrofes, en el país actualmente solo existen mecanismos que tratan este problema cuando un incendio forestal ya ha causado un impacto ambiental significativo, es así que las labores para tratar de apagar un incendio

forestal se dificultan mucho más cuando ya se encuentra en una fase avanzada y se han maximizado las pérdidas del área forestal.

Actualmente el avance tecnológico y la creación de nuevos estándares hacen que problemas ambientales, como un incendio forestal tengan nuevas y mejores alternativas de solución, en este caso la utilización del estándar IEEE 802.15.4 mediante la implementación de una WSN nos permite generar un sistema de prevención, monitoreo y detección de incendios forestales de bajo consumo energético y sin desperdiciar recursos. A diferencia con otras redes inalámbricas como Wifi donde sus recursos son enfocados a la conectividad de usuarios y velocidad de transmisión, en las Redes de Sensores Inalámbricas la principal prioridad es la energía, el tiempo de funcionamiento de cada nodo es un elemento fundamental en base a la duración de su batería, de esta manera para poder obtener un consumo energético idóneo en la red la evaluación de la eficiencia energética de la red es indispensable.

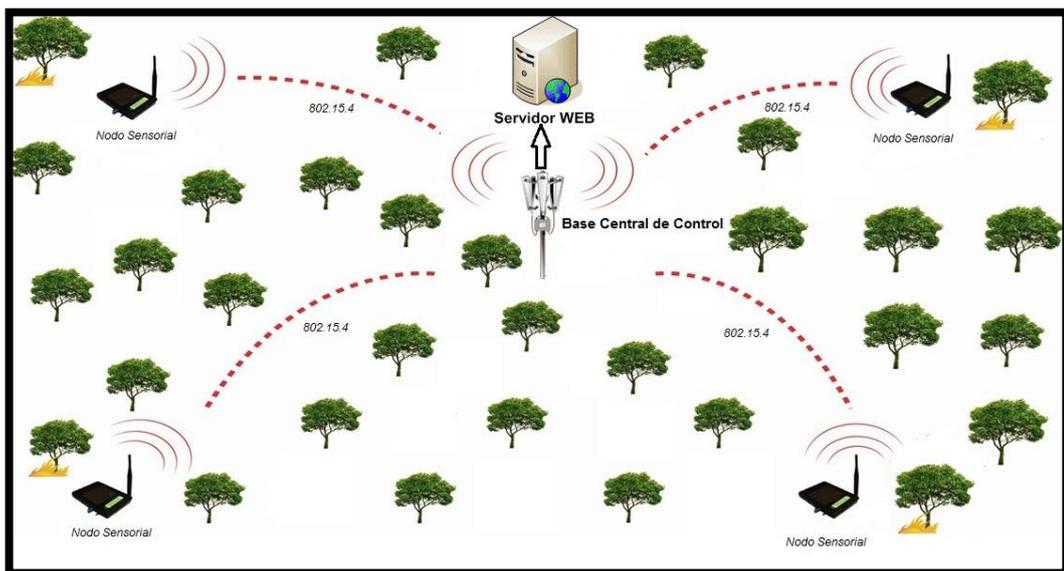
“Las redes de sensores inalámbricos tienen requisitos muy estrictos en términos de consumo de energía” (22). El estándar 802.15.4 permite acoplar en el diseño de redes inalámbricas características muy importantes como son: flexibilidad de red, bajos costos, y bajo consumo de energía; esta tecnología se puede utilizar para muchas aplicaciones de uso doméstico, comercial e industrial que requieren una tasa baja en la transmisión de datos.

La utilización de simulaciones computacionales permiten tener una idea aproximada del funcionamiento real de una red, en este caso se efectuarán simulaciones con las diferentes versiones de Zigbee en donde esté presente el estándar IEEE 802.15.4, que nos permitirán hallar el módulo de transmisión de datos inalámbrico más adecuado tomando en cuenta principalmente el parámetro de consumo de energía.

Existen varias investigaciones que se han realizado acerca del desempeño de una Red Sensorial Inalámbrica. Por ejemplo previamente en la ESPOCH se ha realizado una investigación acerca de la “Evaluación de las topologías físicas de WSN mediante la implementación de un prototipo de medición de variables

ambientales” (15). En el proyecto de investigación se propone realizar la evaluación de parámetros tales como la eficiencia energética, el tráfico y cobertura de una WSN, para determinar el funcionamiento más idóneo de la red dentro de un área forestal con una tecnología Zigbee específica, se diseñará e implementará una WSN compuesta por nodos finales con sensores de temperatura y humo mediante plataformas de hardware libre Arduino y Xbee que envíen todos los datos obtenidos hacia una aplicación para el tratamiento de la información. La representación de la red propuesta se puede observar en la figura I.I.

Figura I.I. Red Sensorial Inalámbrica para sistema de prevención de incendios forestales



Fuente: Los Autores

1.3 OBJETIVO

1.3.1 OBJETIVOS GENERALES:

Evaluar una Red de Sensores Inalámbrica (WSN) basada en el estándar IEEE 802.15.4 y aplicarla en el desarrollo de un sistema de detección de incendios forestales.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:

Investigar el estándar IEEE 802.15.4, así como las tecnologías que se utilizan en las Redes Sensoriales Inalámbricas como las diferentes versiones de Zigbee.

Determinar la versión de la tecnología Zigbee más adecuada para la implementación del prototipo de WSN mediante el desarrollo de simulaciones computacionales utilizando el software NS-2, basado en los parámetros de eficiencia energética, tráfico y cobertura de la red.

Implementar un prototipo de Red de Sensores Inalámbrica con la versión de la tecnología Zigbee escogida y realizar un conjunto de pruebas que permita determinar la agilidad de la detección de posibles incendios forestales.

1.4 HIPOTESIS

La evaluación de la Red de Sensores Inalámbrica mediante los parámetros de eficiencia energética, tráfico y cobertura de las diferentes versiones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, permitirá determinar la versión de Zigbee más adecuada para la implementación de una Red de Sensores Inalámbrica para la detección de incendios forestales.

1.5 MÉTODOS Y TÉCNICAS

1.5.1 MÉTODOS

Método de investigación documental

- Investigar todo lo relacionado a Redes Sensoriales Inalámbricas mediante la recopilación de documentos (Libros, artículos, manuales, investigaciones) que contengan información acerca de la tecnología Zigbee que se va a evaluar.

Método de investigación descriptiva

- Mediante el uso de software realizar una simulación del desempeño de una Red Sensorial Inalámbrica y describir la variable a medir y poder obtener métricas que sirvan para obtener el resultado aproximado a del funcionamiento real de una Red Sensorial Inalámbrica

Método de investigación no experimental

- Mediante la observación de los resultados de la simulación, se puede implementar un prototipo de WSN con los valores de las variables definidas por el software simulador.

1.5.2 TÉCNICAS

Las técnicas que se utilizaran en el proyecto investigativo, son:

- Recopilación de Información
- Análisis y comparación de resultados

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología ha ido creciendo constantemente y con esto su evolución hacia nuevos mecanismos y procesos tecnológicos se genera de manera muy rápida. Cada vez los problemas que afronta la sociedad e industria son resueltos con soluciones tecnológicas nuevas o con la creación de mejores soluciones que reemplazan a tecnologías ya existentes, es así que en el área de las telecomunicaciones este hecho no viene aislado, cada día surgen nuevas necesidades para el manejo de la transmisión de información la cual cada vez es mejor diferenciada y analizada. El motivo de esta investigación se basa en investigar, analizar y evaluar una de las tecnologías que ha surgido en base a cubrir las nuevas necesidades que tienen las comunicaciones inalámbricas en base a la transmisión de información en nuevos tipos de escenarios y ambientes de implementación.

Dentro del desarrollo de las Comunicaciones Inalámbricas se destaca actualmente el uso de las Redes de Sensores Inalámbricas (WSN), las cuales han surgido para solventar nuevas necesidades y resolver problemas en base

al uso de un mecanismo de comunicación inalámbrico para la transmisión óptima de información de nuevos tipos de aplicaciones como: domótica inalámbrica, sistemas de seguridad, controles de acceso, y principalmente el manejo de sensores. Las Redes de Sensores Inalámbricas (WSN) son implementadas mediante la tecnología Zigbee la cual haciendo uso del estándar IEEE 802.15.4 ha permitido generar soluciones en diversas áreas en donde dispositivos sensoriales con un mínimo consumo de recursos y energía pueden actuar como agentes de obtención de datos importantes para su análisis, es así que la presente investigación pretende realizar un análisis y evaluación de una WSN bajo la tecnología Zigbee para la generación de sistemas de prevención, monitoreo y detección de posibles desastres ambientales.

En el desarrollo de esta investigación se pretende realizar una investigación del estándar IEEE 802.15.4 así como las actuales versiones de la tecnología Zigbee que son utilizadas en las Redes de Sensores Inalámbricas, mediante esta investigación poder tener el conocimiento para realizar una evaluación de cada una de las versiones de Zigbee para poder obtener de esta manera la mejor versión de la tecnología que sea apta para el diseño de una WSN para un Sistema de monitoreo, detección y prevención de incendios forestales, con lo cual después de realizar el diseño de la WSN, finalmente realizar la implementación de un prototipo de red para efectuar las pruebas de funcionamiento del Sistema. A continuación se desarrollan cada uno de los capítulos que permiten obtener los objetivos deseados en la presente investigación.

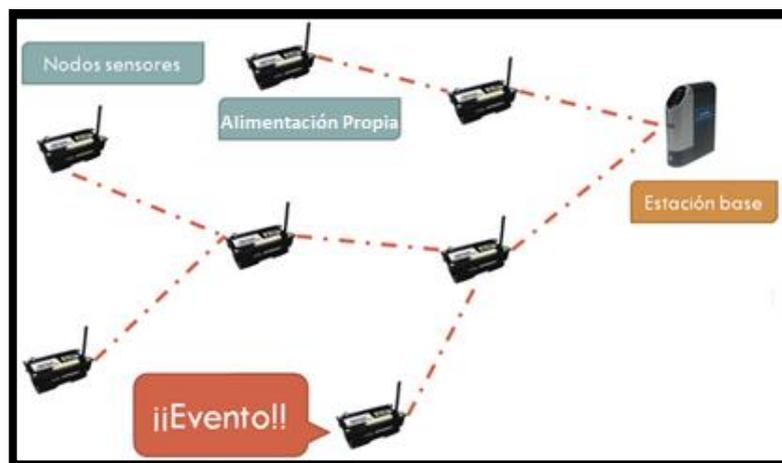
2.2 Red de Sensores Inalámbrica (WSN)

Las Redes de Sensores Inalámbricas que provienen de las siglas WSN (Wireless Sensor Networks), surgieron bajo la necesidad de cubrir áreas de las comunicaciones inalámbricas en donde tecnologías como Wifi, Wimax, y Bluetooth, ya no eran apropiadas o su uso requería demasiado costo de implementación y se tenía un alto desperdicio de recursos, es así que las WSN se definen como un conjunto de nodos que se interconectan de manera

inalámbrica para la transmisión de datos específicos de una aplicación, es decir cumplen un objetivo o tarea específica dentro de la red. Los nodos de una WSN se caracterizan por ser elementos autónomos los cuales recolectan información determinada que es entregada hacia una base de coordinación central.

La Red de Sensores Inalámbrica normalmente se encuentra constituida por un gran número de nodos, los cuales se encuentran distribuidos en diferentes puntos y su principal misión dentro de la WSN es obtener información de su entorno principalmente sobre variables que pueden ser obtenidas por sensores como: la temperatura, humedad, la presión, la vibración, estados ambientales, etc. Estos nodos se caracterizan por su bajo consumo de energía, costo de implementación y principalmente por ser dispositivos autónomos, esto quiere decir que cada nodo se debe encargar de obtener la información de eventos ocurridos en su entorno mediante sus sensores, procesar esta información mediante un módulo de procesamiento y finalmente ser capaz de enviar esta información hacia un nodo receptor o estación base de manera inalámbrica, además la alimentación de energía de cada nodo es propia mediante baterías, ya que las WSN fueron creadas para la implementación de redes inalámbricas en ambientes donde la presencia de energía eléctrica es escasa o totalmente nula, en la Figura II.II se representa una WSN y su estructura.

Figura II.II. Red de Sensores Inalámbrica



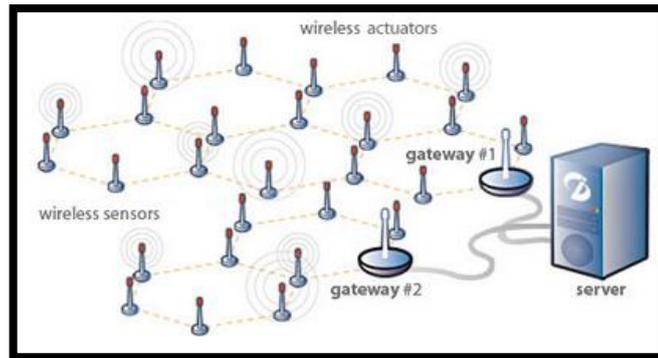
Fuente: Los Autores

2.2.1 Características de la WSN

Las Redes de Sensores Inalámbricas pertenecen al área de las LR-WPAN (20) (Low Rate Wireless Personal Area Network), que son las redes inalámbricas de área personal de bajo nivel de tráfico, ya que en sus inicios la creación de este tipo de redes se basó en la transmisión de información dentro de áreas pequeñas, pero su desarrollo ha ido evolucionando constantemente y hoy en día se tiene la creación de Redes de Sensores Inalámbricas que alcanzan grandes distancias de cobertura. La evolución de las WSN ha dependido siempre del desarrollo que ha tenido la tecnología con la cual se implementan este tipo de redes, es así que el desarrollo de la tecnología Zigbee es la clave de la creación y actual operación de las WSN, a continuación se detalla un conjunto de características que hacen que este tipo de red inalámbrica tenga su importancia como una solución de implementación para escenarios en los que se requiere una baja transmisión de datos, altos niveles de cobertura y sobretodo una optimización en cuanto al consumo de energía dentro de cada nodo:

Alto número de Nodos: Debido a la simplicidad de diseño que tiene este tipo de red, el número de nodos finales que recolectan información dentro de la red inalámbrica puede ser de hasta 65000 nodos con los cuales se puede trabajar a una velocidad de 250 Kbps (6). Con esto se tiene un nivel bajo de ancho de banda pero permite el acoplamiento de una gran cantidad de nodos los cuales pueden brindar un nivel muy elevado de cobertura para toda la red de Sensores, en la figura II.III se puede apreciar la distribución de varios nodos que puede tener la WSN.

Figura II.III. Nodos WSN



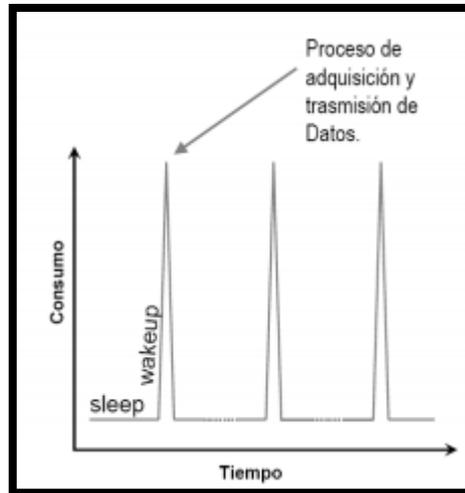
Fuente: <http://www.smartsensorsystems.com/>

Comunicación ad-hoc: Una de las principales ventajas que ofrece una WSN es que el tipo de comunicación que se tiene entre nodos de la red es una conexión descentralizada (7), es decir que la red inalámbrica no depende de un dispositivo único para el encaminamiento del tráfico, sino cada nodo transmite información hacia el nodo que ha sido programado enviar, también de igual manera cada nodo es encargado de encaminar el tráfico que le llega hacia los demás nodos, a comparación de las redes tipo broadcast con las cuales se genera tráfico para toda la red.

Consumo mínimo de Energía: La eficiencia energética es la característica primordial que tiene una WSN, el bajo consumo de energía que tiene cada nodo dentro de la red posibilita alargar el valor de tiempo de vida que tiene cada dispositivo antes de recurrir a un mantenimiento o cambio de baterías para el funcionamiento del mismo, diseñar los nodos dentro de una WSN requiere la utilización de componentes de bajo consumo, ya que al pensar en la implementación de una WSN en ambientes en los cuales la energía eléctrica es un parámetro escaso o en ciertos casos nulo, la alimentación de cada nodo debe ser mediante baterías independientes, es así que el consumo de energía para la recolección de datos y la transmisión de esta información debe ser mínimo. Cada nodo para lograr un consumo eficiente de su energía solo se mantiene activo en los instantes de tiempo en los cuales recolecta información y la transmite, si el nodo no se encuentra realizando ninguna actividad de transmisión automáticamente entra en un estado pasivo de mínimo consumo

de energía como se visualiza en la figura II.IV, para así de esta manera lograr que el consumo de sus recursos energéticos se realice de manera eficiente.

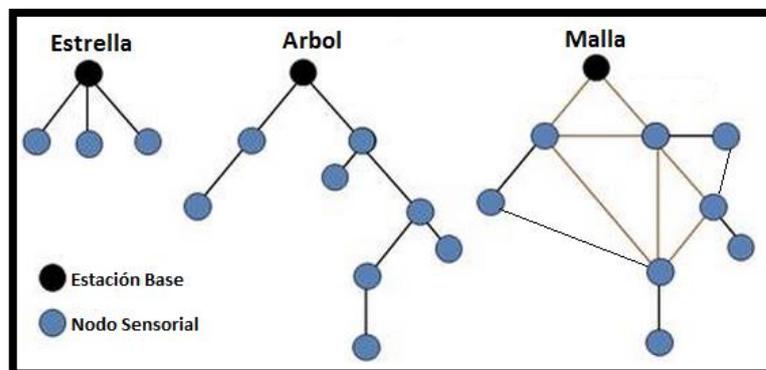
Figura II. IV. Consumo Energía de un nodo



Fuente: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>

Topología y cobertura: En lo que se refiere a la topología de una WSN, se puede decir que soporta varios tipos de topologías y esto depende de la manera en la cual se programa el envío y encaminamiento de la información a través de los nodos de la red, con lo cual la cobertura que tenga la red se basa directamente en el tipo de topología que se utilice en la misma, aunque a una WSN se le puede caracterizar por poseer una topología dinámica, las principales topologías que son utilizadas en un WSN son las topologías de estrella, árbol y la topología en malla como se muestra en la figura II.V.

Figura II.V. Topologías WSN



Fuente: Los Autores

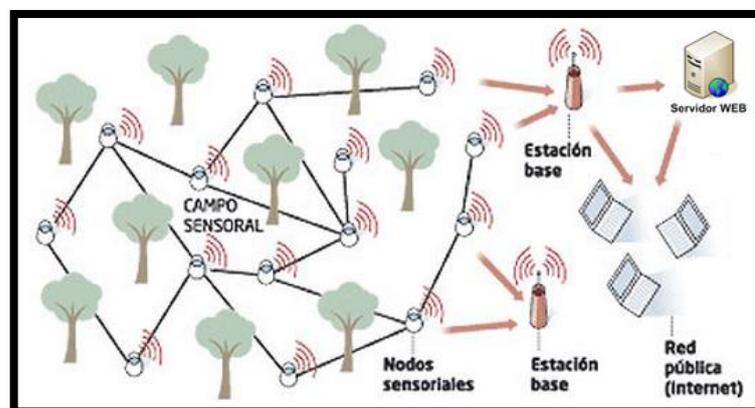
Bajo costo y facilidad de Instalación: El costo de implementación es relativamente bajo a comparación de otras tecnologías inalámbricas y esto se debe a la sencillez que tiene el hardware de la red tanto para los nodos finales como para la estación base, el hecho de que sea una red en la cual se transmite poca información en intervalos de tiempo determinados hace que no se requiera una gran capacidad de procesamiento en los dispositivos y que a su vez su instalación sea de una manera sencilla.

Entre otras características que se pueden exponer sobre las WSN que se consideran como una desventaja son la seguridad de la red, el tiempo de respuesta (latencia) que existe en la red y las limitaciones de hardware que se puede tener al momento de diseñar la red.

2.2.2 Elementos de la WSN

Existen varios elementos que podemos encontrar dentro de una Red de Sensores Inalámbrica, para que en su operación conjunta puedan lograr el funcionamiento normal de la WSN y cumplir con la transmisión de la información que la red está programada a realizar, pero existen elementos principales y que sirven de base para el funcionamiento de una Red de Sensores Inalámbrica los cuales son: Nodos Sensoriales (Motas), Nodos Coordinadores, Gateway, Estación Base, su distribución en la WSN se muestran en la Figura II.VI.

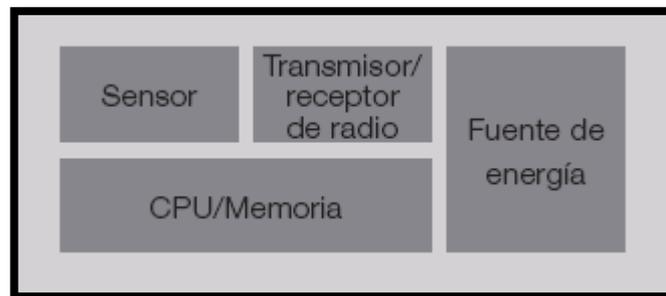
Figura II.VI. Elementos de la WSN



Fuente: <http://www.elmundo.es/>

Nodos Sensoriales (Motas): Los Nodos Sensoriales o también conocidos como Motas son los elementos de la WSN que se encargan de la recolección de información mediante sensores de algún evento o fenómeno físico. Se encuentran contruidos mediante un módulo de Sensores, un módulo de procesamiento y un módulo de transmisión inalámbrica, todo esto alimentado por una fuente de energía independiente, Figura II.VII.

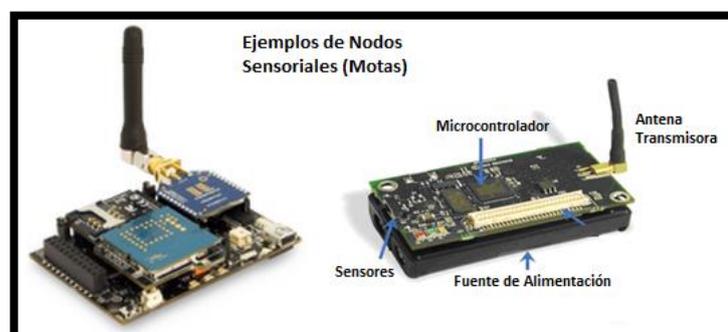
Figura II.VII. Arquitectura Nodo Sensorial



Fuente: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>

Los nodos sensoriales se construyen mediante placas en las cuales se incluyen cada módulo: los sensores, el circuito microcontrolador encargado del procesamiento, la interfaz de transmisión inalámbrica y la fuente de energía la cual suele ser una batería de corriente continua (CC), o un conjunto de baterías pequeñas, en general un Nodo Sensorial suele tener un tamaño de dimensiones pequeñas como se visualizar en la figura II.VIII, cada nodo sensorial es programado para enviar la información que obtiene hacia un nodo en específico o hacia un conjunto de nodos de la red.

Figura II.VIII. Nodo Sensorial WSN



Fuente: Los Autores

Nodos Coordinadores: Los nodos coordinadores son los nodos encargados de recibir toda la información enviada por cada nodo sensorial dentro de la WSN, cada nodo coordinador recibe la información de la WSN de manera inalámbrica, se encarga de agrupar esta información y la reenvía hacia el equipo encargado del almacenamiento o tratamiento de la información que puede ser a manera de ejemplo un servidor de datos.

Gateway: El Gateway es el elemento encargado de interconectar la Red de Sensores Inalámbrica con una red TCP/IP, este elemento permite que toda la información recopilada dentro de la WSN se pueda enviar hacia redes de datos Ethernet y con esto la salida de la información hacia internet.

Estación Base: En este elemento de la WSN es donde se recibe toda la información de la red para su procesamiento y entendimiento, es decir en la estación base se encuentran concentrados tanto los nodos coordinadores, los equipos que almacenan información (computadores) y los gateways, de esta manera en la estación base se encuentran los equipos que permiten procesar la información de la WSN para la visualización de la misma.

2.3 Tecnología Zigbee

La creación y desarrollo de las Redes de Sensores Inalámbricas tuvo su origen gracias a la tecnología Zigbee, la cual se define como un conjunto de protocolos de comunicaciones inalámbricas basados en el estándar IEEE 802.15.4 para la transmisión de datos que se enfoquen en la baja cantidad de tráfico y en mejorar la vida útil de un nodo de comunicación mediante el mejor manejo de su consumo energético. Bajo estas necesidades en el año 2000 se empieza a desarrollar investigaciones sobre sistemas de comunicaciones inalámbricas de bajo consumo energético y bajo costo de implementación a cargo de "Zigbee Alliance"(32), este grupo de investigación logro establecer la tecnología Zigbee con el uso del estándar IEEE 802.15.4 (17) a finales del año 2003.

Las especificaciones de la tecnología Zigbee permiten establecer los parámetros de funcionamiento de una WSN que van desde la creación de

redes de enlace punto a punto hasta redes ad-hoc para la unión de varios nodos de transmisión, definiendo los niveles de red básicos para una comunicación inalámbrica, el uso del estándar IEEE 802.15.4 con la tecnología Zigbee permiten definir el nivel físico y el control de acceso al medio para redes inalámbricas de área personal enfocándose en la comunicación entre dispositivos cercanos con transmisión de datos de baja velocidad para de esta manera proporcionar soluciones para sistemas inalámbricos que realicen un intercambio de información específico y requieran un consumo mínimo de energía para su funcionamiento.

Al igual que otras tecnologías como Wifi y Bluetooth, Zigbee define parámetros sobre el funcionamiento de la red basándose en un estándar base para posteriormente definir los parámetros a nivel de aplicación que se pueden generar con este tipo de soluciones. También se debe destacar que actualmente la tecnología Zigbee es mayormente implementada en hardware por el grupo Digi (29), el cual se encarga de generar los módulos de comunicación inalámbricos Xbee, con los cuales se puede construir las Redes de Sensores Inalámbricas, existe una gran variedad de dispositivos Xbee que haciendo uso de la tecnología Zigbee brindan un conjunto de diferentes soluciones dependiendo de las necesidades del diseño de la red.

2.3.1 Descripción y Características

El uso de la tecnología Zigbee permite realizar el reemplazo de las comunicaciones de pequeños volúmenes de tráfico dados por un medio guiado por una comunicación serial inalámbrico, en la tabla II.I se definen los parámetros de funcionamiento de la tecnología Zigbee en comparación a otras tecnologías de comunicación inalámbrica:

Tabla II.I. Comparación Tecnologías Inalámbricas

Comparación entre tecnologías inalámbricas wifi, bluetooth, Zigbee			
	WiFi (IEEE 802.11g)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	ZigBee (IEEE 802.15.4)
Radio	DSSS (direct sequence spread spectrum)	FHSS (frequency hopping spread spectrum.)	DSSS (direct sequence spread spectrum)
Velocidad	54 Mbps	1 Mbps	250 kbps
Nº de nodos por master	32	7	64.000
latencia	hasta 3 s	hasta 10 s	30 ms
Tipo de datos	Video, audio, gráficos, Película, ficheros	Audio, gráficos, Película, ficheros	Pequeños paquetes de datos
Alcance (m)	100	10 (v1.1)	70 - 100 - 1000
Expansión	Roaming	No	si
Duración batería	12 y 48 horas	1 semana	mayor a 100 días
Complejidad	complejo	Muy complejo	Sencillo
Aplicación Principal	WLAN	WPAN	Control y monitorización
Memoria necesaria	1 MB+	250KB+	4KB – 32 KB
Parámetros mas importantes	Velocidad y flexibilidad	Costes y perfiles de aplicación	Fiabilidad, bajo consumo y bajo coste

Fuente: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>

2.3.2 Estándar IEEE 802.15.4

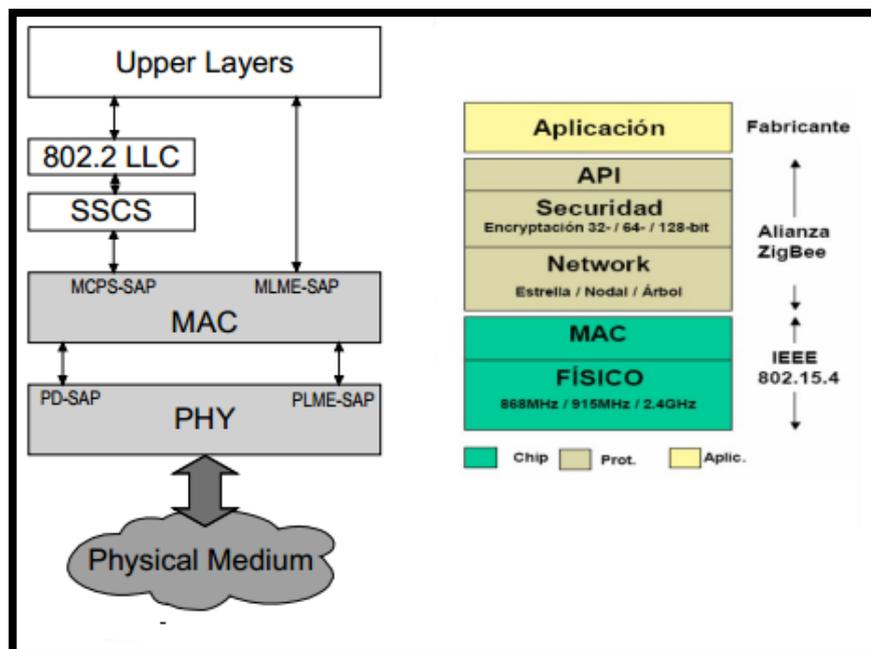
El Estándar IEEE 802.15.4 dentro de su aplicación en las Redes de Sensores Inalámbricas se encarga de definir la estructura y funcionamiento de la red en los niveles de capa física (PHY) y a nivel de acceso al medio (MAC), esto lo ha realizado mediante la generación de especificaciones las cuales se encontraron a cargo del grupo de trabajo del IEEE “*IEEE 802.15 WPAN Low Rate Alternative PHY Task Group 4a (TG4a)*” (18), quienes confirmaron la última especificación del estándar en el año 2006 en la cual se detalla todas las características y estructura de operación del estándar dentro de la red inalámbrica.

2.3.2.1 Arquitectura del Estándar IEEE 802.15.4

La arquitectura del estándar IEEE 802.15.4 está definida en términos de un número de bloques o capas con el fin de simplificar la estructura del mismo. Cada capa es responsable por una parte del manejo de normas que rigen dentro del estándar para la red inalámbrica y por otra se encargan de ofrecer servicios a las capas superiores. La disposición de las capas se basa en el modelo de capas abierto OSI. De esta manera se puede decir que el estándar es el encargado de la definición de normas que rigen en el modelo de capas, tanto para capa física como para la capa de acceso al medio,

Un dispositivo o nodo dentro de la WSN dispone de una interfaz inalámbrica para la transmisión de radiofrecuencia (RF) junto con su mecanismo de control de bajo nivel los cuales pertenecen a la capa PHY del estándar, y una subcapa MAC es la que se encarga de proporcionar el acceso al canal físico para todos los tipos de transmisión que se generen. En la figura II.IX se puede visualizar como se encuentran la distribución de estas dos capas dentro del estándar para la comunicación inalámbrica. (20)

Figura II.IX. Arquitectura IEEE 802.15.4



Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

Tanto la capa 1 (PHY) y capa 2 (MAC), son estructuradas por el estándar, mientras que las capas superiores dependen totalmente del planteamiento de la tecnología y de la aplicación que a la que va a ser destinada la red, como se puede apreciar en la figura II.IX, el estándar 802.15.4 se encarga de generar las bases de la estructura de funcionamiento del acceso al medio, mientras que la tecnología Zigbee se encarga de las capas superiores pertenecientes a la red, seguridad y aplicación.

2.3.2.2 Capa Física (PHY)

Dentro del manejo de la capa PHY se proporciona los servicios de gestión de datos a nivel físico PHY, el cual se encarga de la transmisión y recepción de unidades de datos de protocolo PHY (PPDU) a través del canal físico de radio inalámbrico, así como también los mecanismos y técnicas de modulación para el transporte de los datos por el medio inalámbrico. (20)

Las principales actividades y características que se tienen en la capa física PHY son la activación y desactivación del transmisor de radio, la selección del canal inalámbrico a utilizar, así como también la evaluación del canal, la transmisión por medio del canal inalámbrico, así como manejar la recepción de los paquetes que se reciben a través del medio físico.

- **La activación y desactivación del transmisor:** La capa física tiene el control sobre la utilización del medio de transmisión el cual puede variar entre tres estados: transmitir, recibir, o en modo pasivo (sleep).

- **Detección de Energía (ED):** Se utiliza para el cálculo de la intensidad de señal recibida en base a un valor por defecto, el valor obtenido de esta relación permite elegir el canal para la transmisión.

- **Indicador de calidad del enlace (ICT):** Evalúa cada paquete recibido en el módulo de transmisión según la potencia con la que llegan hacia el dispositivo para determinar la calidad del mismo.

- **Evaluación de canal (CCA):** Mediante esta función se puede determinar que canal está ocupado o que canal se encuentra libre para la transmisión, se implementa el mecanismo de prevención de colisiones (CSMA -CA).

- **Selección de la frecuencia:** Mediante esta función se obtiene la frecuencia del canal en la cual se va a transmitir.
- **Transmisión y recepción de datos:** Se mantiene el manejo del envío y recepción de datos por el medio físico. (20)

El estándar IEEE 802.15.4 tiene especificadas las frecuencias de uso para los enlaces de radio dentro de una red inalámbrica, es así que las frecuencias utilizadas para la transmisión de enlaces bajo el estándar están dadas en las bandas no licenciadas correspondientes a los siguientes rangos:

- 868 a 868,6 MHz en Europa
- 902-928 MHz en América del Norte
- 2400 a 2.483,5 MHz a nivel mundial. (20)

La norma adicionalmente especifica las siguientes características dentro de la capa PHY para las modulaciones dentro de las bandas de frecuencia mencionadas anteriormente:

- La modulación BPSK, con secuencia directa de espectro ensanchado en las bandas de frecuencia de 868/915 MHz.
- La modulación O-QPSK empleando compensación de cuadratura de fase para la banda de frecuencia de 868/915 MHz, también se aplica la modulación ASK para el manejo de cambio de amplitud.
- La modulación O- QPSK para la banda de frecuencia de 2450 MHz. (20)

Mediante la tabla II.II se muestra los valores que tiene cada banda de frecuencia del estándar 802.15.4 sobre el tipo de modulación y los parámetros de velocidad de transmisión de datos para la red inalámbrica:

Tabla II.II. Parámetros de bandas de frecuencia 802.15.4

PHY (MHz)	Banda de Frecuencia (MHz)	Parámetros de Propagación		Parámetros de Datos		
		Chip rate (kchip/s)	Modulación	Bit rate (Kb/s)	Symbol rate (Ksymbol/s)	Symbols
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binario
	902-928	600	BPSK	40	40	Binario
868/915 (opcional)	868-868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (opcional)	868-868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Ortogonal
	902-928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Ortogonal
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Ortogonal

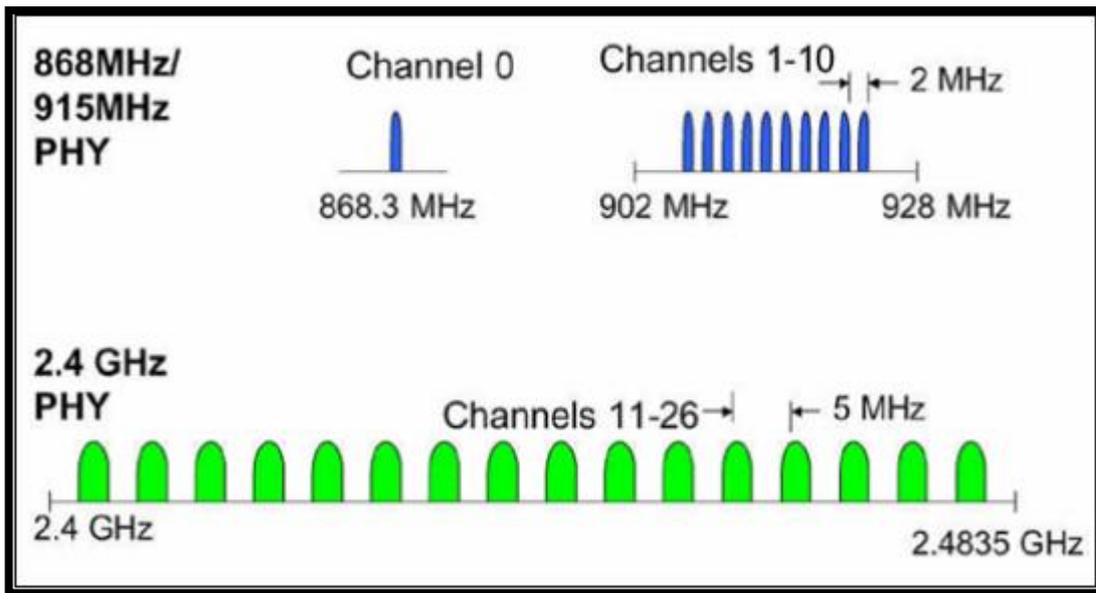
Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

En cuanto a la definición de los canales que se pueden utilizar en cada frecuencia las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4 vienen dadas bajo las siguientes apreciaciones:

- Para la banda de frecuencia de los 2,450 GHz se tienen la disponibilidad de 16 canales. (20)
- Para la banda de frecuencia de los 915 MHz se tienen disponibles 10 canales y en la banda de 868 MHz se encuentra disponible 1 canal. (20)

En la figura II.X se puede apreciar la distribución de las frecuencias dentro de cada una de las bandas de frecuencias del estándar IEEE 802.15.4, en el cual se establecen parámetros para la distribución de los canales, en la banda de los 915 MHz se tiene una separación entre canales (banda de guarda) de 2 MHz, mientras que en la banda de frecuencia de los 2,4 GHz se tiene una separación entre canales de 5 MHz

Figura II.X. Estructura de los canales de frecuencia en IEEE 802.15.4



Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

Para el cálculo de la frecuencia central de cada canal en las diferentes bandas que se presentan en el estándar, se tiene la tabla II.III, en la cual se detalla cómo obtener la frecuencia central dependiendo en que banda se encuentre, en donde “k” representa el número de canal:

Tabla II.III. Frecuencias de canales IEEE 802.15.4

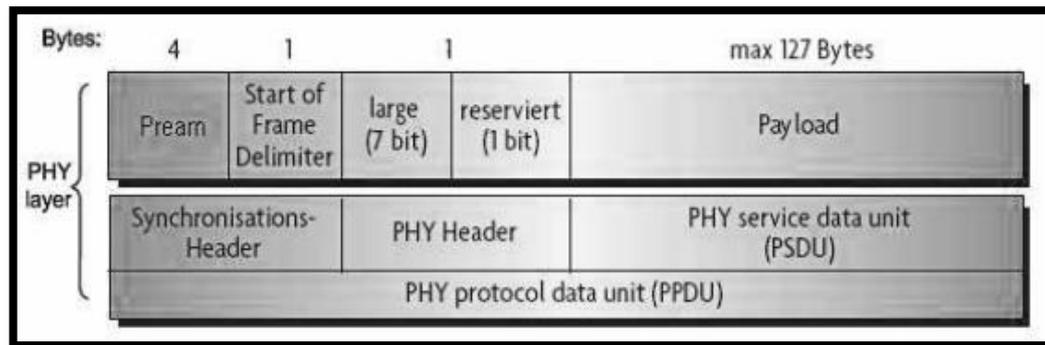
Número de Canales	Frecuencia central de Canal (MHz)
k = 0	868.3
k = 1,2,... 10	$906 + 2(k - 1)$
k = 11,12,... 26	$2405 + 5(k - 11)$

Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

Por ejemplo para saber el valor de la frecuencia central que tiene el canal número 12 de la banda de 2405 MHz se usa la ecuación número 3 perteneciente a la banda y se obtiene que el valor de la frecuencia será 2410 MHz. (20)

En lo correspondiente a la estructura de la trama de la capa PHY, lo establecido por el estándar 802.15.4 (20), se muestra en la figura II.XI, en la cual se puede observar la estructura que tiene cada trama:

Figura II.XI. Estructura Trama PHY IEEE 802.15.4



Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

En donde el valor de *Synchronisations-Header*, es correspondiente a la sincronización de la trama. El valor de *PHY Header*, es la cabecera de la trama y especifica el tamaño de la misma. El valor de *PHY (PSDU)*, es el segmento designado para los datos de la capa física en el cual se encapsula la trama MAC, el tamaño máximo soportado es de 127 bytes. (20)

2.3.2.3 Capa de Acceso al Medio (MAC)

En la capa de acceso al medio conocida como MAC del estándar IEEE 802.15.4 (20), se establece la estructura y parámetros que tiene esta capa la cual sirve como intermediaria entra la capa física PHY y las capas superiores de la Red Inalámbrica.

La estructura de la capa MAC del estándar 802.15.4 (20), se caracteriza por una baja complejidad lo cual le permite una fácil asociación a cualquier tipo de servicio que se pueda dar en la red inalámbrica. Las funciones principales que se realizan en esta capa son las validaciones de las tramas de envío por el canal, el manejo de acuses de recibo (ACK), para la comunicación entre dos nodos, además de asegurar los mecanismos de acceso al canal inalámbrico. Además la capa de acceso al medio MAC se encarga de proporcionar dos tipos de servicios hacia las capas superiores mediante los SAPs (*Service Access Points*). (20)

Para la comunicación entre los nodos de la red inalámbrica a nivel de capa 2, el modelo de transferencia de datos definido en el estándar especifica el uso de

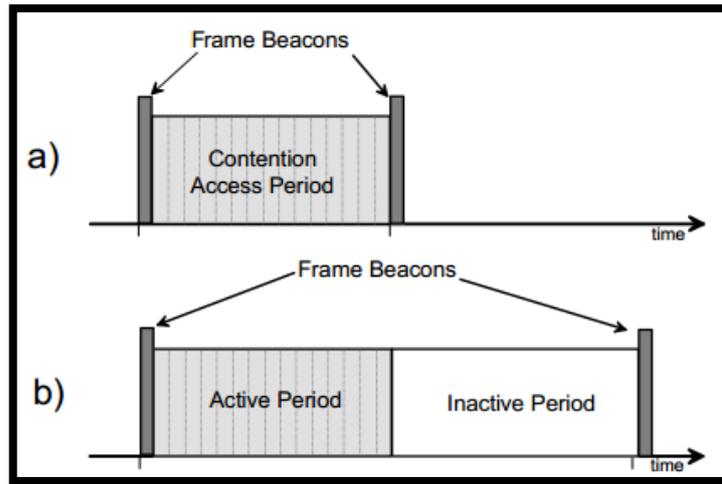
las **Súper-tramas**, mediante esta estructura de trama el estándar incluye la mejora de la probabilidad de entrega exitosa de paquetes y se tiene una alta consideración del consumo de energía.

En el estándar se define el formato de la Súper-trama en función al nodo coordinador, la estructura de cada súper-trama se encuentra determinado por "Frame Beacons" (20), conocidas como balizas de red las cuales son enviadas por el nodo coordinador, véase figura II.XII.a, especificando el intervalo de tiempo de acceso al medio las cuales se encuentran divididas en 16 ranuras del mismo tamaño (20). Otro tipo de trama enviado en formato Súper-trama es para los intervalos de tiempo de transmisión de información, la cual se divide en dos segmentos o periodos, el periodo activo y el periodo inactivo visualizado en la figura II.XII.b.

Durante el periodo inactivo, el nodo coordinador entra en estado de no transmisión, modo de bajo consumo (sleep) (20). El nodo coordinador utiliza este periodo de la estructura de la súper-trama para apagar todas las transmisiones. Durante este periodo las Frame Beacons (20) de la trama se utilizan para sincronizar los dispositivos conectados dentro de la red.

Durante el periodo activo, cualquier nodo que desee establecer una comunicación envía su trama la cual compite con otros nodos para acceder a la comunicación, el mecanismo empleado para el acceso al medio está dado por CSMA-CA ranurado. Todas las transmisiones son completadas durante el periodo activo de la súper-trama, si la transmisión no se completó se debe esperar al siguiente periodo de transmisión.

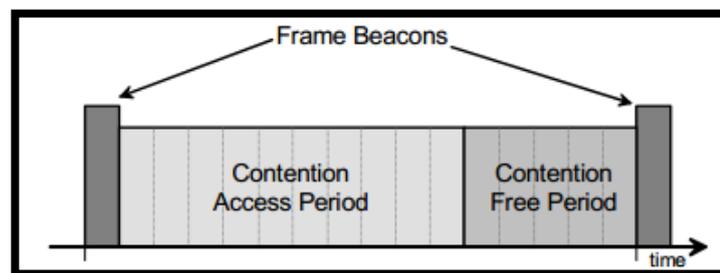
Figura II.XII. Estructura Súper-trama IEEE 802.15.4



Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

También durante el intervalo de tiempo del periodo activo de transmisión de la trama el estándar establece parámetros para el manejo de las aplicaciones de baja latencia o aplicaciones que requieren un ancho de banda específico de datos, el nodo coordinador puede establecer porciones del periodo activo de la súper-trama para los datos de la aplicación, estas porciones de la trama se denominan intervalos de tiempo garantizadas (GTS) (20), los GTS forman parte del periodo libre de contención (CFP), que siempre se encuentra al final de la estructura de la súper-trama en su periodo activo como se visualiza en la Figura II.XIII. (20)

Figura II.XIII. Periodo de Contención Súper-trama IEEE 802.15.4



Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

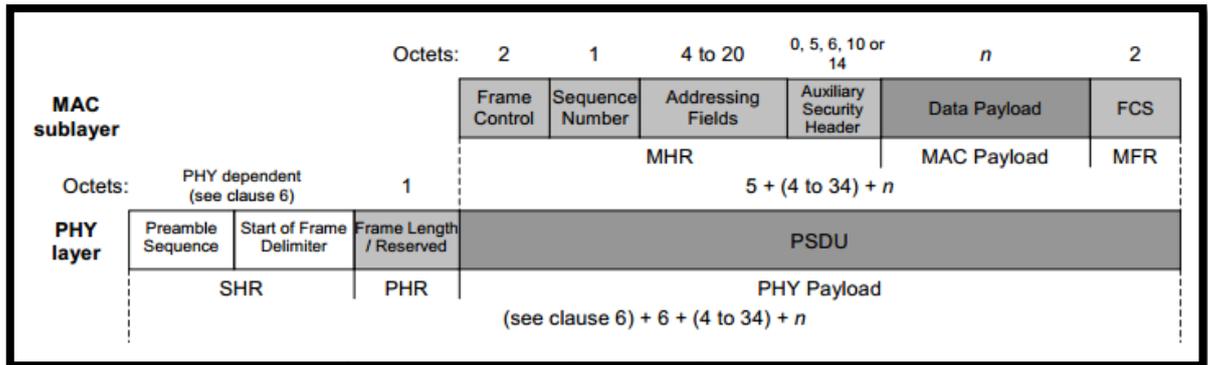
2.3.2.4 Estructura de la trama en la capa de Acceso al Medio (MAC)

En la definición del estándar se promueve que la estructura de la capa MAC, tenga una estructura sencilla, para de esta manera fortalecer una de las ventajas de implementación del tipo de redes inalámbricas donde el estándar es la base de diseño. Dentro del tipo de tramas que se pueden encontrar en esta capa tenemos las siguientes:

- Trama de “*beacon*”: este tipo de trama es utilizada por el nodo coordinador.
- Trama de Datos: Este tipo de trama es utilizada para la transmisión pura de datos.
- Trama de confirmación: Las tramas de confirmación (ACK), son utilizadas para validar que una transmisión se realizó con éxito.
- Trama de control: Este tipo de tramas se utilizan para la administración de todas las transmisiones dentro de la capa de acceso MAC (20).

La trama se encuentra estructurada por un conjunto de parámetros los cuales se delegan para una función específica dentro de la capa, es así que como podemos observar en la figura II.XIV. Cada parámetro de la trama ocupa un espacio en bits y se destina para una actividad en específico, de tal manera que tenemos que la primera sección de la trama está compuesta por el MHR el cual contiene los siguientes campos: Unidad de control de la trama (*Frame Control*) (20), número de secuencia de datos (DSN), la unidad de direccionamiento y de manera opcional puede ir el encabezado de seguridad auxiliar. Estos campos nos sirven como cabecera de la trama MAC y sirven para la sincronización y direccionamiento de la trama, después de los campos de la MHR, la trama está compuesta por la sección en donde se transmiten los datos en general (*Data Payload*) (20). Finalmente en la sección de MFR se tiene el control de envío y recepción de la trama.

Figura II.XIV. Estructura Tramas IEEE 802.15.4



Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

La carga útil de datos que tiene la subcapa MAC se conoce como la unidad de datos de servicio MAC (MSDU). Toda la trama de la subcapa MAC es encapsulada dentro de trama de la capa física PHY en la sección de PSDU para su envío por el medio inalámbrico.

2.3.2.5 Tipos de transmisión en Capa de Acceso al Medio (MAC)

Para realizar la transmisión de los datos dentro de la red inalámbrica el estándar introduce tres tipos de transmisión que son realizados en la capa de acceso al medio (MAC) entre los nodos de la red:

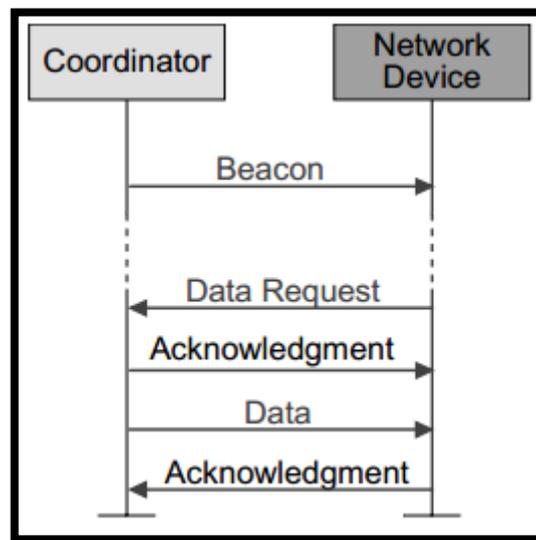
- La transmisión desde el nodo Coordinador hacia un nodo de la red inalámbrica
- La transmisión desde un nodo de la red hacia el nodo Coordinador de la red inalámbrica
- La transmisión de datos entre dos nodos finales o intermediarios de la red inalámbrica. Este tipo de transmisión no es soportado en topología estrella debido a que la comunicación en este tipo de topología se realiza solo entre un nodo coordinador y un nodo de la red específico.

Transmisión de datos desde Nodo Coordinador hacia un Nodo de la red:

Cuando un nodo coordinador desea transmitir datos hacia un nodo dentro de la red, el primer paso que realiza es transmitir un “*beacon*” (20), con el cual indica que el coordinador tiene pendiente la entrega de datos. El nodo que se encuentra escuchando periódicamente los “*beacons*” del coordinador detecta

que se encuentra una transmisión pendiente con lo cual solicita al Nodo Coordinador la transmisión de los datos mediante CSMA-CA, de esta manera el nodo coordinador reconoce la solicitud de datos y mediante el envío de una trama de confirmación de la solicitud el coordinador procede de manera seguida a enviar la trama de datos hacia el nodo, el cual si recibe exitosamente la trama se encarga de enviar una trama de confirmación opcional hacia el coordinador para indicar que la transmisión ha llegado sin problemas. Finalmente el coordinador elimina el “*beacon*” de datos pendientes por transmitir, en la figura II.XV se puede visualizar el proceso de comunicación.

Figura II.XV. Transmisión desde Coordinador

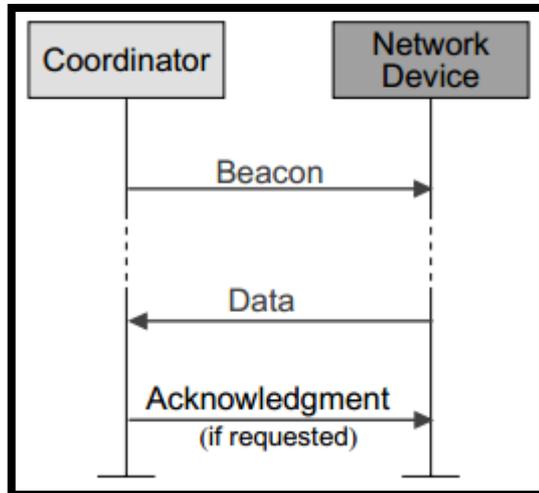


Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

Transmisión de datos hacia el Nodo Coordinador: Cuando un nodo dentro de la red desea transmitir sus datos hacia un nodo coordinador que se encuentre habilitado, el primer paso que realiza es escuchar el “*beacon*” (20) en la red generado por el Coordinador, si el “*beacon*” se encuentra en el estado activo, el nodo busca sincronizarse con la estructura de la súper-trama, para de esta manera el nodo mediante el mecanismo de acceso CSMA-CA poder transmitir su trama de datos hacia el coordinador. Después de lograrse la transmisión satisfactoria el coordinador se encarga de enviar el acuse de recibo (ACK) para confirmar que los datos se han recibido correctamente este proceso

se puede visualizar en la figura II.XVI. La confirmación del coordinador se puede dar de manera opcional.

Figura II.XVI. Transmisión hacia Coordinador



Fuente: IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

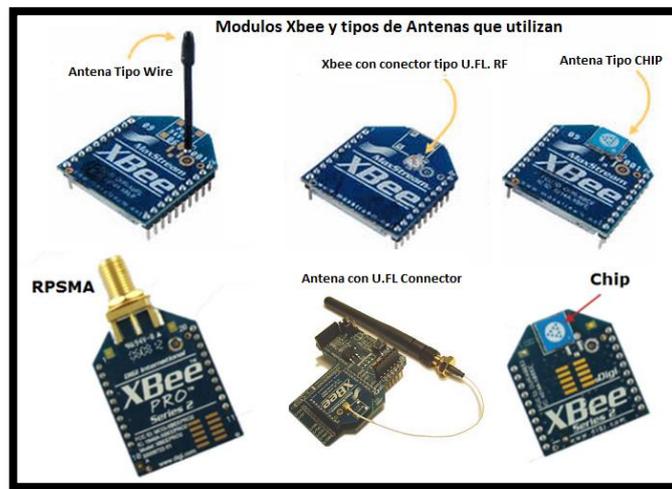
Transmisión de datos entre nodos finales o intermedios: Para la definición de este tipo de transmisión el estándar establece que cada nodo puede comunicarse con cualquier otro nodo que se encuentre dentro de su parámetro de cobertura para poder establecer la comunicación, el mecanismo con el cual se puede realizar la transmisión de datos es CSMA-CA (20), en el cual dos o más nodos compiten por obtener el canal y transmitir su información, para lograr de manera eficiente este proceso los dispositivos o nodos de la red deben estar sincronizados constantemente.

2.3.3 Módulos de Transmisión Xbee

Los módulos de transmisión inalámbrica Xbee, son desarrollados por el grupo Digi, el cual se ha encargado de generar una gran variedad de modelos para la creación de redes basadas en la tecnología Zigbee. Cada día la evolución de este tipo de interfaces inalámbricas ha permitido mejorar los parámetros de cobertura, tráfico y consumo energético que tienen las WSN, es así que sus inicios las redes construidas a base de Xbee tenían alcances para la transmisión de datos de área personal con distancias máximas de 10 a 50

metros, hoy en día las mejores versiones de Xbee pueden ofrecer cobertura para la transmisión a distancias de hasta 10 kilómetros, esto se ha logrado mediante la implementación de interfaces con antenas que poseen mejor ganancia en base a su consumo energético. Un módulo Xbee se caracteriza por ser una placa pequeña de pocos centímetros de dimensión a la cual se le puede acoplar diferentes tipos de antenas, en la figura II.XVII se puede visualizar el diseño de un módulo Xbee con los diferentes tipos de antenas que puede poseer.

Figura II.XVII. Módulos Xbee y tipos de antenas



Fuente: Los Autores

Los diferentes tipos de antenas utilizados en los módulos Xbee como se visualizó en la figura II.XVII son utilizados según la necesidad de diseño de la red, a continuación se describe cada tipo de antena:

Antena tipo Wire: Este tipo de antena es utilizado en la mayoría de los módulos Xbee con el cual viene acoplada, su dimensión es pequeña, aproximadamente 20 cm y tiene una ganancia de 2,1dBi (24, 25).

Antena con conector tipo u.FL: Mediante este tipo de conectores se puede acoplar antenas de mejor tamaño y ganancia hacia el módulo Xbee, teniendo valores de hasta 9,5 dBi (24, 25).

Antena tipo Chip: La antena tipo chip, es un tipo de antena el cual no necesita de cables externos al módulo, sino viene totalmente acoplada para su funcionamiento.

Antena con conector tipo RPSMA: Este tipo de conector permite acoplar antenas más grandes reduciendo el nivel de pérdidas por conexión hacia el Módulo, se pueden obtener ganancias de hasta 13,5 dBi (24, 25).

La conexión que necesita cada módulo de Xbee para su funcionamiento con un módulo de procesamiento dentro del nodo sensorial es muy sencilla, ya que las plataformas Xbee solo necesitan para su operación básica la utilización de 4 pines, 2 para transmisión y recepción de la información y 2 para alimentación a voltaje y tierra, véase figura II.XVIII. Para el acoplamiento es necesario el uso de un shield con el cual puede unirse a plataformas de procesamiento como Arduino.

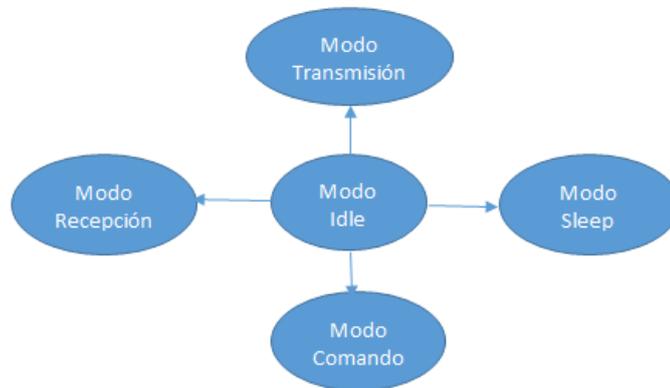
Figura II.XVIII. Conexiones Plataforma Xbee



Fuente: <http://www.andresduarte.com/arduino-y-xbee>

Para realizar tareas más complejas se puede hacer el uso de otros pines con los que cuenta el módulo Xbee, con los cuales puede configurarse cinco modos de transmisión, a continuación en la figura II.XIX se los visualiza:

Figura II.XIX. Modos de transmisión del Módulo Xbee



Fuente: Los Autores

Modo Idle.- El módulo se encuentra en modo IDLE cuando no está realizando ninguna acción, no transmite, no recibe, no está en modo Sleep y tampoco en modo comando.

Modo Transmisión – Recepción.- Se halla en éstos modos cuando el módulo toma algún paquete por medio de la antena (Modo recepción) o cuando algún paquete se encuentra esperando en el buffer del pin de salida para posteriormente ser transmitido.

La data transmitida puede ser enviada directa o indirectamente; enviarla directamente significará que los paquetes llegaran hacia el destino inmediatamente luego de su envío. Cuando se realiza un envío indirecto la data es detenida durante un espacio de tiempo y se la enviará solamente cuando la dirección de destino lo solicita.

Así mismo cuando se transmite información se lo puede efectuar de dos maneras, unicast y broadcast. En el modo unicast el envío de los paquetes va desde un punto a otro y es en este modo en el que se recibe una respuesta (ACK) del nodo que recibe el paquete, en caso que no se reciba el ACK se reenviará la información hasta que se reciba el ACK.

En el modo Broadcast es entre un nodo y todos los que se encuentren en la red inalámbrica, en este modo no hay una respuesta (ACK)

Modo Comando.- En este modo se admite ingresar comandos AT al módulo que estamos utilizando para configurar o modificar parámetros de éste.

Para ingresar en este modo se utilizó el programa X-CTU que maneja UART, para usar este modo se debe esperar un tiempo entregado por el comando GT (Tiempo de Guarda) por defecto es igual a $ATGT = 0x3E8$, este tiempo equivale a 1000 ms; luego se ingresa +++ y se espera otro GT. El módulo entregará un "OK" de respuesta, el Xbee viene por defecto con una velocidad de 9600 bps, y una razón para no poder ingresar a este modo es debido a la diferencia de velocidades entre la interfaz de comunicación serial y el módulo.

Modo Sleep.- Este modo hace posible que el módulo Xbee entre en un modo de bajo consumo de energía cuando este no está en uso. Para que el módulo entre en este modo se debe verificar que cumpla con los siguientes términos:

- Pin 9 (Sleep_RQ) está en alto y el módulo está en pin Sleep mode (Sm = 1, 2 o 5).
- El módulo se encuentra en reposo es decir no hay ni recepción ni transmisión de información por un tiempo dado por ST (Time before Sleep) y éste se encuentra activado cuando SM = 4,5.

2.3.3.1 Funcionamiento de Xbee con Plataforma Arduino

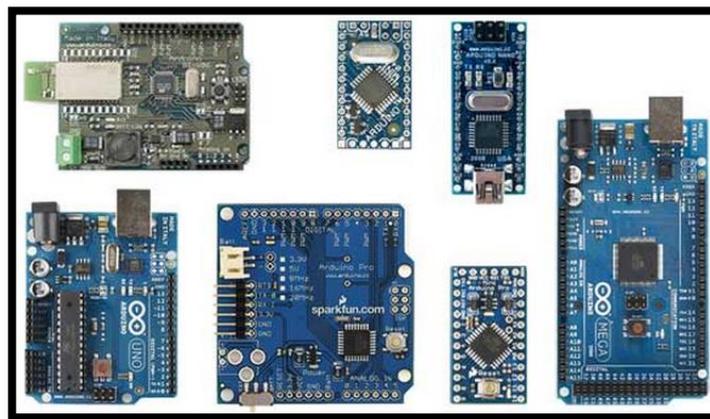
La plataforma Arduino presta beneficios tanto en hardware como en software para su uso en las WSN con los módulos Xbee, en la parte de hardware se puede ver que la plataforma Arduino permite la operación de una gran variedad de microprocesadores de diferentes gamas los cuales son montados en una placa para su fácil utilización, además su gran nivel de compatibilidad de hardware con diferentes tipos de sensores, ya sean estos analógicos o digitales hace que pueda ser utilizado de manera universal.

Mientras que en la parte de software, el desarrollo de Arduino de un IDE (Entorno de desarrollo integrado) para la programación de los procesos de sus placas, ha sido una gran ventaja ya que el nivel de dificultad de la programación del microprocesador mediante este entorno es de un nivel muy

sencillo y práctico. Una plataforma tanto en hardware como software bajo una licencia libre permite manejar de manera más autónoma las funciones de un proyecto, es funcional en cualquier sistema operativo y es una de las plataformas más accesibles haciendo referencia al costo de la misma.

Para la elección de qué tipo de placa y microcontrolador se puede utilizar para su funcionamiento con los módulos Xbee la plataforma Arduino cuenta con una gran variedad de placas y diferentes modelos, las versiones varían según el tipo de microcontrolador que utiliza la placa de Arduino, como se visualiza en la figura II.XX (28). Los microcontroladores más usados son de la marca ATMEL, siendo los modelos más utilizados los: Atmega168, Atmega328, ATmega8 caracterizados por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños.

Figura II.XX. Modelos de placas de Arduino



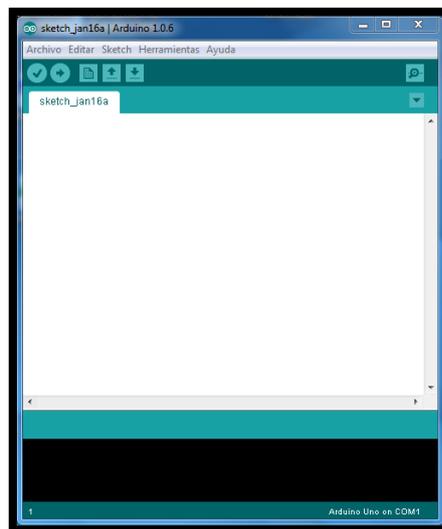
Fuente: www.arduino.cc

La plataforma de Arduino tiene desarrollado su propio Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) para la programación de sus placas. El IDE de Arduino es un entorno de programación basado en dos lenguajes de programación libres, tanto el Processing el cual se encuentra basado en Java y sirve para el desarrollo de proyectos multimedia y en este caso es el encargado de dar la cara hacia la parte de desarrollo de código que el usuario ingresa dentro del entorno de programación de Arduino. El segundo lenguaje de programación en el que está basado es IDE de Arduino es el Wiring, el cual se encarga de

compilar y ser el medio ensamblador entre el código que produce el usuario (lenguaje de alto nivel) y la programación que es ingresada en el microcontrolador para su entendimiento (lenguaje de bajo nivel).

Es así que se puede contar con un Entorno de Desarrollo Integrado, para el desarrollo de los códigos de Arduino el cual se puede obtener desde la misma página web de Arduino ya que este software es bajo licenciamiento libre puede ser descargado sin ninguna limitación. El software es soportado tanto en Windows, Linux o Mac OS, en este caso para el desarrollo de este proyecto usamos la versión del IDE para Windows, véase figura II.XXI. (28)

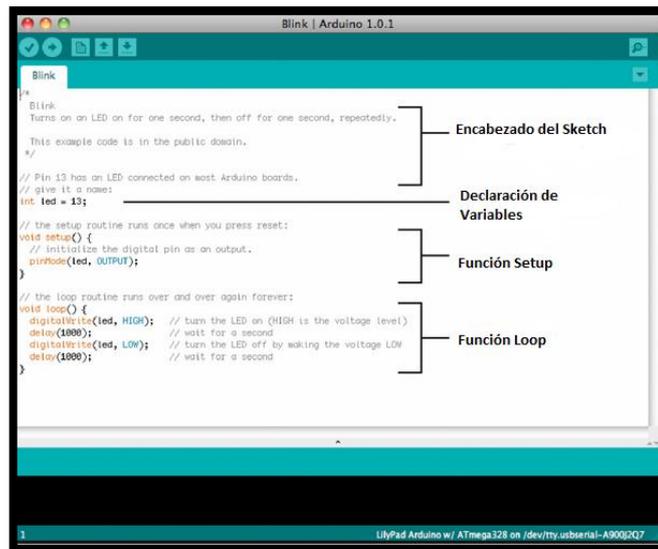
Figura II.XXI. IDE Arduino



Fuente: www.arduino.cc

Para la creación de un código o programa, en el IDE se debe crear un “Sketch”, que es conocido como el código que va a ejecutarse constantemente dentro de un microcontrolador. El Sketch es construido mediante lenguaje de programación Arduino el cual tiene cierto parecido a lenguaje Java, el Sketch siempre tiene una estructura fija y está compuesto por tres partes en las cuales se va a insertar el código de programación que se quiere ejecutar en el microcontrolador, las tres partes que conforman la estructura del Sketch son: Encabezado, Función Setup y Función Loop, véase figura II.XXII. (28).

Figura XXII. Sketch Arduino



Fuente: www.arduino.cc

En el **Encabezado** se declaran todas las librerías que se van a necesitar para ejecutar el código, muchas librerías ya vienen incluidas por defecto dentro del IDE, pero se pueden necesitar librerías externas o la creación de una nueva librería para que el programa se ejecute correctamente, normalmente las librerías externas son necesarias cuando se requiere cierta compatibilidad con el hardware de los dispositivos externos a la tarjeta Arduino, como pueden ser sensores, actuadores, pantallas, etc. Además en esta sección del Sketch se publican las variables globales que se utilizan dentro del programa principal, las variables pueden ser de diferentes tipos: enteras (int), Carácter (char), double, etc.

La **función Setup** hace referencia a un código o programa que será ejecutado por primera y única vez por el microcontrolador cuando este empiece a funcionar, es decir en la función Setup se tiene un código que solo se ejecutará una vez mientras el microcontrolador este prendido, la función Setup puede requerir librerías o variables del encabezado.

```
Void Setup(); {  
    ***Código***  
}
```

La **función Loop** hace referencia a un código o programa que se ejecutara constantemente en el microcontrolador mientras el dispositivo se mantenga encendido, es decir la función loop repite ejecuta su código y lo repite de manera constante mientras se encuentre funcionando la placa Arduino.

```
Void Loop(); {  
    ***Código****  
}
```

Mediante el IDE de Arduino se puede verificar si la programación realizada es correcta ya que se puede compilar el código creado antes de su envío hacia el microcontrolador. Si el código no tiene ningún error en su contenido, mediante el mismo IDE de Arduino también se puede quemar el código creado dentro del microcontrolador mediante una conexión serial que se establece con la tarjeta de Arduino.

Para la configuración del Módulo Xbee se creará un Sketch en el entorno de desarrollo de arduino (IDE) con el código necesario para que el Nodo Sensorial realice sus actividades dentro de la WSN, el cual se ejecuta mientras el microcontrolador se encuentre encendido.

Para el desarrollo de esta investigación se ha tomado en cuenta las mejores versiones con las que actualmente cuenta Digi en su desarrollo, ya que la investigación está enfocada a la evaluación de una WSN para ambientes forestales de grandes distancias de cobertura, es necesario tener en cuenta las versiones de la plataforma Xbee que cuentan con los mejores parámetros de cobertura para cubrir grandes distancias que se exigen en el diseño de una WSN para áreas forestales.

Del conjunto de versiones con las que cuenta la plataforma Xbee, se ha decidido evaluar las versiones Xbee serie 2, Xbee Pro 2,4GHz y la versión Xbee Pro 900MHz, las cuales cuentan con un conjunto de características que les permiten ser implementadas para este tipo de ambientes, la versión sobrante Xbee Serie 1 está diseñada para ambientes pequeños, por lo cual no

se tomara en cuenta para este análisis. En el siguiente apartado se describe cada versión y sus características de funcionamiento.

2.3.3.2 Versión Xbee Serie 2

La versión Xbee Serie 2 (23), fue ingresada al mercado por Digi desde el año 2007, con esta versión se propuso grandes mejoras a comparación de las versiones de la Serie 1 de Xbee. Los módulos XBee Serie 2 fueron diseñados para operar dentro del protocolo ZigBee solucionando nuevas necesidades de aplicación con bajo costo y bajo consumo de energía en redes de sensores inalámbricas, estos módulos fueron diseñados para operar en la banda de frecuencia de 2,4GHz, algunas de sus principales especificaciones se muestran en la tabla II.IV (23):

Tabla II.IV. Características Xbee Serie 2

Características Xbee Serie 2		
Cobertura	Interior / urbana:	hasta 113' (40 m)
	Exterior/Áreas Rurales:	hasta 400' (120 m)
Potencia de Transmisión:		2 mW (3 dBm)
Sensibilidad de Receptor:		- 95 dBm
Velocidad de Transmisión RF:		250 Kbps
Consumo Energético	Transmisión:	40 mA (con 3,3V)
	Recepción:	40 mA (con 3,3V)
	Modo Sleep:	< 1 uA

Fuente: Xbee Series 2 OEM RF Modules, Product Manual v1.x.1x - ZigBee Protocol

En las características de esta versión se puede notar sus niveles bajos de consumo energético en base a la distancia y tráfico que puede soportar, otras características importantes son que cuenta con DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) (23), Cada canal de secuencia directa puede alojar 65.000 direcciones de red para nodos de la red, además soporta topologías punto a punto, punto a multipunto y malla, su configuración es muy sencilla para un funcionamiento básico y cuenta con los modos de AT y API para configurar los parámetros del módulo.

2.3.3.3 Versión Xbee Pro 2,4GHz

La versión Xbee Pro 2,4GHz (24), fue lanzada al mercado por Digi en el año 2009, en cual se proponía generar módulos de comunicación inalámbrica de grandes distancias de cobertura y que sean operativos en bandas libres como en los 2,4 GHz, de esta manera generar soluciones que vayan más allá de los alcances de otras tecnologías como Wifi y sean fáciles de implementar con bajos costos haciendo uso de una banda de frecuencia de libre ocupación. Sus principales características se muestran en la tabla II.V (24), en el cual sobresale su amplia cobertura en base a su bajo consumo energético.

Tabla II.V. Características Xbee Pro 2,4GHz

Características Xbee Pro 2.4GHz		
Cobertura	Interior / urbana:	hasta 300' (90 m)
	Exterior/Áreas Rurales:	hasta 1 milla (1600 m)
Potencia de Transmisión:		63 mW (18 dBm)
Sensibilidad de Receptor:		- 100 dBm
Velocidad de Transmisión RF:		250 Kbps
Consumo Energético	Transmisión:	250 mA (con 3,3V)
	Recepción:	55 mA (con 3,3V)
	Modo Sleep:	< 10 uA

Fuente: XBee/XBee-PRO RF Modules, Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol

La versión Xbee Pro también cuenta con DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) (24), Cada canal de secuencia directa puede alojar 65.000 direcciones de red para nodos de la red, otra característica importante es que esta versión contiene una convertidor analógico-digital (24), para el envío de información. Su alcance teórico de hasta 1 milla lo convierten como una versión idónea para la implementación de la red en áreas forestales.

2.3.3.4 Versión Xbee Pro 900MHz

La versión Xbee Pro 900MHz (25), surgió como una variante al uso de las frecuencias libre de 2,4GHz, en las que el espectro ya se encuentra saturado por la gran cantidad de aplicaciones que funcionan en esta banda, es así que también se desarrolló un módulo Xbee para operar en la banda de los 900

MHz, en la cual según las definiciones del estándar las características de operación del módulo inalámbrico presentan varias diferencias, en la tabla II.VI, podemos especificaciones de esta versión Xbee que fue lanzada al mercado por el grupo Digi en el año 2008.

Tabla II.VI. Características Xbee Pro 900MHz

Características Xbee Pro 900MHz		
Cobertura	Interior / urbana:	hasta 450' (140 m)
	Exterior/Áreas Rurales:	hasta 1,8 millas (3 km)
Potencia de Transmisión:		50 mW (17 dBm)
Sensibilidad de Receptor:		- 100 dBm
Velocidad de Transmisión RF:		156,25 Kbps
Consumo Energético	Transmisión:	210 mA (con 3,3V)
	Recepción:	80 mA (con 3,3V)
	Modo Sleep:	< 60 uA

Fuente: XBee-PRO 900/DigiMesh 900 OEM RF Modules, Product Manual

En las características de esta versión se puede ver como se mejora los parámetros de cobertura debido a la banda de frecuencia que se utiliza, pero se ve reflejado en el valor de la tasa de transmisión de datos, también se identifica por soportar topologías punto a punto, punto a multipunto y malla (25).

2.4 Modelo de propagación para la WSN

Existen varios modelos de propagación que sirven para modelar el comportamiento de las señales que se transportan de manera inalámbrica, en este caso para realizar el diseño de una Red de Sensores Inalámbrica dentro de un escenario como es el Área Forestal se deben tomar en cuenta parámetros que influyen en el comportamiento y atenuación de la señal como:

- La densidad de los árboles.
- Las difracciones que se dan debido a la presencia de obstáculos dentro del área
- La irregular topografía que puede presentar el terreno.

Los modelos Empíricos como Lee (1), Weissberger (10), ITU-R (11) y COST235 (12), sirven para predecir valores como cobertura de la señal, potencia recibida y pérdidas que tiene un enlace inalámbrico.

A continuación se describe cada uno de los modelos y sus aportes para el modelamiento de las pérdidas que tiene un canal inalámbrico dentro de ambientes Forestales.

2.4.1 Modelo de Lee

La cobertura que puede tener un Nodo Sensorial dentro de la WSN, está basada en la cobertura de la señal que produce el nodo dentro del área en donde se encuentra. El objetivo del modelo de predicción de Lee es pronosticar la potencia recibida en una zona determinada, sin embargo no siempre se puede llegar a predecir los valores de cobertura en la red inalámbrica debido a que existen parámetros tales como el desvanecimiento de la señal en su trayectoria y la variedad de obstáculos que pueden afectar dichas predicciones

El modelo de predicciones de Lee fue creado por William C. Y. Lee en el año de 1977, el cual estableció un conjunto de procesos para predecir la potencia que se recibe en un nodo el cual se encuentra en un terreno con múltiples obstáculos que imposibilitan la línea de vista directa entre emisor y receptor. Este modelo puede emplearse en diferentes entornos como se muestra en la tabla II.VII.

Tabla II.VII. Entornos para Modelo Lee

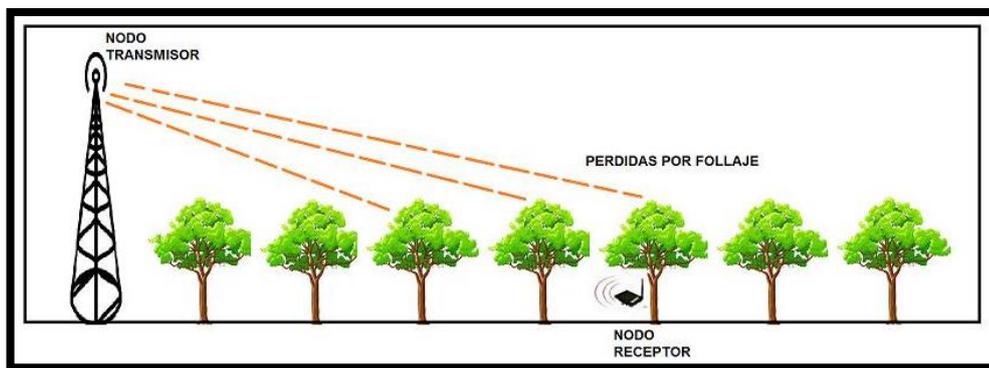
Estructuras hechas por el hombre	Terrenos Naturales
Áreas con edificios	Terrenos planos
Áreas abiertas	Terrenos montañosos
Áreas suburbanas	Sobre agua
Áreas urbanas	Áreas con mucho Follaje

Fuente: W. C. Y. Lee, Wireless and Cellular Telecommunications

Dentro de una red inalámbrica la señal transmitida se desplaza por múltiples trayectorias, para determinar las pérdidas por trayectoria de esta señal se puede utilizar el modelamiento **punto-punto** propuesto por el Modelo de Predicciones de Lee (1).

El modelado Punto-Punto de Lee permite obtener las pérdidas por difracción, teniendo en cuenta que la trayectoria directa de una señal transmitida entre el emisor y el receptor se encuentra obstaculizada sin permitir línea de vista directa, lo que ocasiona que la señal llegue hacia el receptor por medio de difracciones lo cual produce un nivel de pérdidas mayor, en el caso de estudio estas pérdidas de difracción son ocasionadas por la presencia de abundante follaje perteneciente al Área Forestal en estudio, véase figura II.XXIII.

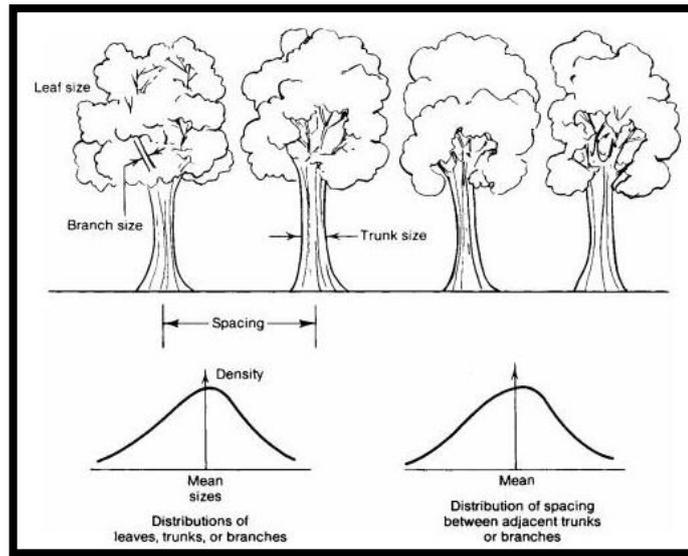
Figura II.XXIII. Pérdidas por Obstáculos en Área Forestal



Fuente: Los Autores

Según Lee, la pérdida ocasionada por el Follaje de un Área Forestal es un tema muy complicado, que tiene muchos parámetros y variaciones. Los tamaños, densidad y distribución de las hojas, ramas y troncos son considerados; así como la altura de los árboles en relación con la altura de las antenas (1). Los estudios de William Lee para las pérdidas por follaje tienen tres niveles, visualizados en la figura II.XXIV: troncos, ramas y hojas, cada uno de estos niveles tienen una distribución de tamaños específicos, así como la textura y espesor de las hojas que son un factor que también cuenta (1). Este tema de análisis resulta muy complicado es así que para el diseño de la WSN la estimación de la recepción de la señal debido a la pérdida por follaje de un Área Forestal no necesita un grado exacto de precisión, sin embargo una estimación aproximada debería ser suficiente para el propósito de diseño de la WSN.

Figura II.XXIV. Características del ambiente con Follaje



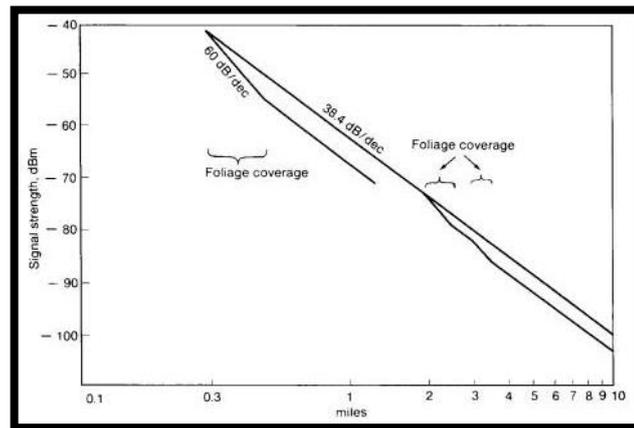
Fuente: W. C. Y. Lee, Wireless and Cellular Telecommunications

Además se debe recalcar que la mayoría de especies arbóreas como por ejemplo el Eucalipto o los Alisos en algunas temporadas del año pierden su follaje, al contrario de especies como el Pino el cual nunca lo hace; estos eventos hacen que sea de mayor dificultad la predicción real de la pérdidas que produce el follaje en determinadas épocas del año, un caso práctico de este tipo de fenómeno se da cuando la longitud de las agujas de pino alcanza un tamaño aproximado de 6 pulgadas, que es la media longitud de onda de 800 MHz, una gran cantidad de energía de la señal puede ser absorbida por los árboles de pino (8,9). En las zonas tropicales los tamaños de las hojas son tan grandes y gruesas que la señal apenas logra penetrar, en este caso la señal se propagará desde la parte superior del árbol hasta la parte inferior donde el encuentra el nodo receptor (1).

Es así que en este modelo la pérdida por follaje a lo largo de la trayectoria de radio se define como 40 dB por década, que es 20 dB más que la pérdida que se da por el espacio libre, con la misma cantidad de pérdida adicional que se encuentre por parámetros del Sistema de comunicación (8,9), Por lo tanto, el modelo especifica que si el escenario involucra tanto la pérdida por follaje del área y las pérdidas por el enlace inalámbrico, la pérdida total sería de 60 dB por décadas el cual resulta de la sumatoria de: 20 dB de pérdida en el espacio

libre más 20 dB por pérdida de follaje y 20 dB debido a la comunicación inalámbrica. Mediante la figura II.XXV se aprecia un ejemplo de las pérdidas producidas por follaje alineado a lo largo de la trayectoria de la radiocomunicación (1).

Figura II.XXV. Pérdidas por Follaje según Modelo de Lee

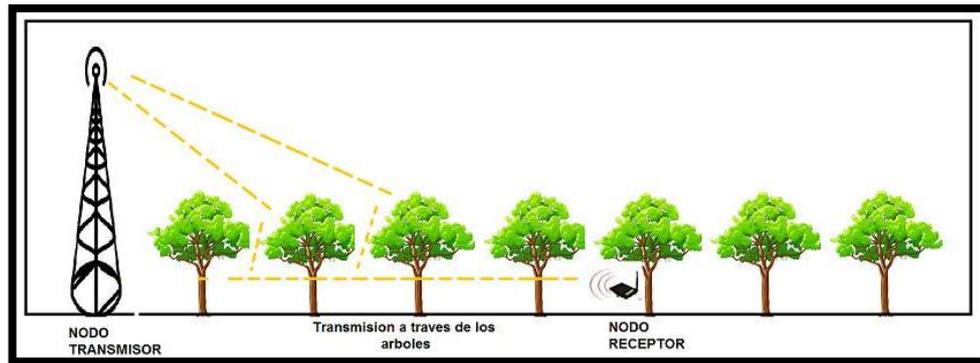


Fuente: W. C. Y. Lee, Wireless and Cellular Telecommunications

2.4.2 Modelo de Weissberger

Este modelo conocido también como el modelo de Decaimiento Exponencial Modificado (2, 10), se aplica en los entornos cuyo trayecto del rayo de la señal inalámbrica se encuentra obstaculizado por un conjunto de árboles caracterizados por la densidad de hojas secas que se encuentran en ambientes templados. El modelo es aplicado en situaciones en las cuales es más probable que la propagación de la señal inalámbrica se origine a través de los árboles de un bosque, en su interior; en lugar de que el fenómeno de difracción se origine sobre la parte superior de los árboles, véase figura II.XXVI.

Figura II.XXVI. Propagación, Modelo de Weissberger



Fuente: Los Autores

La fórmula de pérdidas en decibelios por la presencia de follaje en el área de transmisión está dada de la siguiente manera:

$$L_w(dB) = \begin{cases} 1.33 \times f^{0.284} \times p^{0.588} & 14m < p \leq 400m \\ 0.45 \times f^{0.284} \times p & 0m < p \leq 14m \end{cases}$$

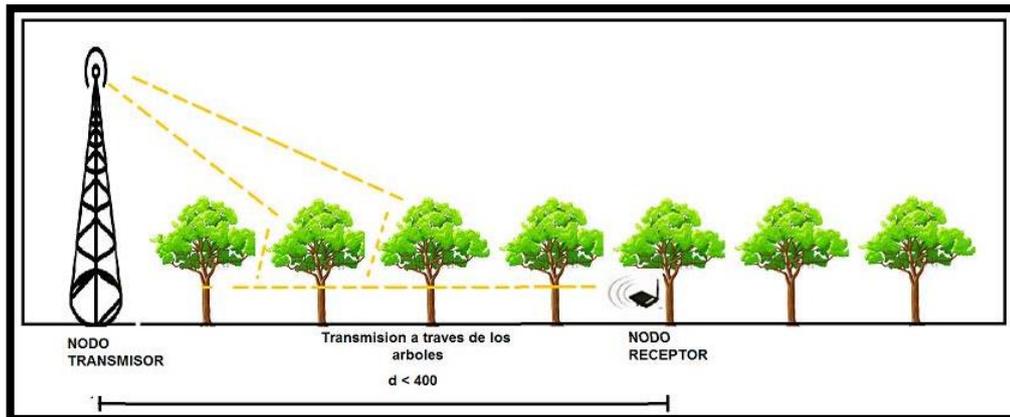
Donde la variable L_w representa la pérdida en decibelios por vegetación presente en el área de transmisión, la variable “f” es la frecuencia expresada en GHz y “p” es el valor de la distancia que existe desde que la señal ingresa al área forestal hasta donde se encuentra el dispositivo receptor.

Otro parámetro de pérdidas tomado en cuenta en el modelo es dado por la temporada del año, si los árboles tienen presencia de follaje (hojas), la pérdida por trayectoria de la señal está dado por aproximadamente un valor de 3 a 5 dB (2). Mientras que en la temporada en la cual los árboles se encuentran sin hojas este parámetro es despreciable.

2.4.3 Modelo ITU Recomendación (ITU-R)

Este modelo fue desarrollado a partir de las mediciones efectuadas en la banda de UHF (Ultra High Frecuency 300MHz – 3GHz), y fue planteado únicamente para los casos en los que la distancia entre el transmisor y el receptor de un enlace inalámbrico sea menor a 400m (2), para lograr que la mayoría de la señal se propague a través de los árboles, este modelo está diseñado para una agrupación de árboles pequeña, véase figura II.XXVII.

Figura II.XXVII. Propagación, Modelo ITU-R



Fuente: Los Autores

Donde el valor de las pérdidas dado en decibeles L_{ITU} , depende del valor de la frecuencia en MHz y la distancia en metros, dada la ecuación de la siguiente manera:

$$L_{ITU-R}(dB) = 0.2 \times f^{0.3} d^{0.6}$$

2.4.4 Modelo COST235

El modelo COST235 (2, 12), fue formulado en base a las mediciones realizadas en pequeñas áreas forestales de distancias menores a 200 metros, y para el rango de frecuencias dado desde los 9.6 GHz hasta los 57.6 GHz. Expresando las pérdidas por la presencia de vegetación de la siguiente manera:

$$L_w(dB) = \begin{cases} 26.6 \times f^{-0.2} d^{0.5} & \text{out - of - leaf} \\ 15.6 \times f^{-0.009} d^{0.26} & \text{in - leaf} \end{cases}$$

La pérdida en decibeles L_{COST} se puede obtener en base a dos ecuaciones, la primera se obtiene en ambientes con árboles sin hojas, y la segunda cuando existe un ambiente con hojas. El valor de frecuencia se debe expresar en MHz y la distancia en metros ($d < 200$), (12).

A partir del estudio del modelo se pudo determinar que la obtención de la pérdida en base a los parámetros de vegetación-trayectoria puede ser expresada como sigue, (12):

$$L_{foliage}(dB) = A \times f^B d^C$$

Los tres parámetros A, B y C se pueden optimizar empíricamente en base a técnicas de regresión basadas en los datos de medición específicos, (2,12).

Mediante la tabla II.VIII se realizó una comparación de los modelos detallados anteriormente para obtener el modelo que cumple las características y necesidades que se propone en este estudio. Con la tabla de comparación se pudo obtener que el modelo de Weissberger cumple con las características necesarias para ser el modelo utilizado para el análisis de propagación de una WSN.

Tabla II.VIII. Comparación de modelos de propagación

	Comparación de Modelos de propagación de la investigación			
	Lee	Weissberger	ITU-R	COST235
Calculo de Perdidas	Modelo general, establece una pérdida de 20 dB	En base a la frecuencia del enlace, altura de los árboles y densidad de hojas	En base a la frecuencia y distancia del enlace	En base a la frecuencia y distancia del enlace
Distancia máxima de calculo	no especifica	no se basa en la distancia	< 400 metros	< 200 metros
Frecuencias de operación	no especifica	UHF	UHF	de 9.6GHz hasta 57.6GHz
Características del Área Forestal	Área con mucho follaje	Áreas con bastante densidad de hojas	Agrupación pequeña de arboles	Áreas con poca o bastante densidad de hojas
Cumple con el escenario planteado	No Cumple	Si Cumple	No Cumple	No Cumple

Fuente: Los autores

2.5 Simulaciones computacionales

En la actualidad el hacer uso de herramientas de software para la realización de simulaciones computacionales de procesos y fenómenos se presta para dos grandes frentes de investigación (30). Inicialmente para el perfeccionamiento de simulaciones computacionales es de vital importancia el desarrollo de modelos matemáticos los cuales permitirán representar un entorno físico aplicado a diferentes campos que investigan la actuación de elementos

electrónicos, comportamiento de variables como consumo energético, el tráfico de paquetes que se da en una red entre otros parámetros que pueden ser de importancia para el estudio de casos específicos.

Dentro de los frentes de investigación también se involucra el hecho tanto de plantear como de mejorar las técnicas de programación y métodos numéricos avanzados para resolver sistemas de ecuaciones adquiridos a partir de los modelos desarrollados.

Las simulaciones computacionales se han desarrollado con el fin de entender la manera cómo funcionan algunos sistemas y la forma como interactúan con los estímulos del entorno. De este tipo de software cabe destacar que permiten ahorrar costos para el desarrollo de los procesos así como el significativo tiempo que conlleva encontrar el punto ideal para la operación haciendo que los recursos utilizados para el estudio sean totalmente optimizados.

2.5.1 Software para simulación

Un simulador es una herramienta de software que trata de reproducir la actuación de un sistema, los simuladores se pueden diferenciar entre dos tipos: los simuladores basados en tiempo continuo y los simuladores basados en eventos discretos (13), recalcando que la gran mayoría de software son simuladores basados en eventos discretos.

En los simuladores basados en tiempo continuo la actuación del sistema se representa en ecuaciones diferenciales y la simulación radica en dar solución al sistema de ecuaciones. En la simulación de eventos discretos la actuación del sistema se representa como una sucesión de eventos que deben ser ajustados a un punto discreto en el tiempo que lleva realizar la simulación y toma también una cierta cantidad de eventos del tiempo real. La gran cantidad de eventos que se generó anteriormente deben ser gestionados por un planificador que permiten que se den las simulaciones fuera de línea, así también existen algunos planificadores de eventos en tiempo real los que pueden utilizar como entrada tanto datos de una aplicación o de una red real y

brindar como salida datos que se enviarán a una aplicación específica o datos que pueden ser enviados a la entrada de una red real.

Una simulación basada en eventos discretos está constituida de bibliotecas de modelos y un motor de simulación (13), éste ejecutará el escenario planteado así como describirá los acontecimientos de la simulación; las librerías constituyen los modelos existentes para simular el sistema que se desea entre ellas los protocolos, los elementos que se utilizarán en la red o las aplicaciones. Este tipo de simuladores necesita como entrada los datos del escenario propuesto y un comportamiento, generando como resultado trazas.

Acorde al simulador que se utilice, los parámetros de entrada así como la forma de actuación de la simulación se puede realizar mediante un script, un fichero de código, mediante comandos o simplemente utilizando una interfaz gráfica.

Debido a la gran demanda que se da por parte de los investigadores en el campo de las redes existen gran cantidad de simuladores enfocados hacia las redes, a continuación se dará algunas de las opciones más relevantes para realizar la simulación de una red de sensores inalámbrica.

SENS (Sensor, Environment, and Network Simulator) (13)

Es un simulador de redes que se aplica para el desarrollo de redes de sensores, está constituido por tres elementos que pueden ser intercambiables así como extensibles; elementos físicos, de red y aplicación (13). Los elementos físicos se utilizan para realizar el modelamiento de sensores y otros componentes que se encuentran operando dentro del entorno de simulación. Los elementos que componen la red se encargan de simular las funciones tanto de envío y recepción de paquetes en los elementos de la capa física; los elementos de aplicación se manejan para realizar la ejecución de la simulación en los sensores.

En este simulador se puede variar los componentes así como añadir nuevos elementos para realizar las simulaciones, como sensores, modelos de red y aplicaciones.

SENSORSIM (Marco de simulación para Redes) (14)

SensorSim es un marco de simulación que implanta nuevas técnicas y modelos para el diseño y el análisis de los sensores del entorno de simulación. Este simulador hereda las características centrales del evento tradicional conducidos por las redes simuladas a las que se puede agregar nuevas características en el modelado de los elementos presentes en el escenario de simulación como el modelado del rendimiento energético, simulación de tipo híbrida que da lugar a la interacción de nodos simulados y nodos reales, protocolos nuevos de comunicación así como la visualización de resultados al usuario. (14)

OMNET ++

Es un ambiente de simulación de eventos discretos, el principal uso de ésta aplicación se lo da en las redes de comunicación, pero debido a su flexible y genérica arquitectura se utiliza en diferentes áreas como la simulación de sistemas complejos de TI, redes de colas o arquitecturas de hardware (31)

Los módulos de éste simulador se programan en C ++, luego se ensamblan en componentes y modelos más grandes usando un lenguaje de alto nivel, NED. La reutilización de modelos viene de forma gratuita. OMNeT ++ tiene un amplio soporte GUI, y debido a su arquitectura modular, el núcleo de simulación (y modelos) puede ser incrustado fácilmente en sus aplicaciones. Omnet ++ está ganando gran popularidad como una plataforma de simulación, así como en entornos industriales, y la construcción de una gran comunidad de usuarios. (31)

NS-2

Es un simulador de eventos discretos orientado a objetos, es uno de los simuladores en la actualidad con más popularidad dentro del campo de la investigación. Ns-2 se basa en una combinación de C++ y OTcl, a C++ es el lenguaje de programación tanto para extender librerías como para implementar protocolos y otras funcionalidades dentro del entorno de simulación. Otcl es utilizado para crear y controlar el entorno de simulación.

Ns2 es una modificación de los módulos orientados a redes ad hoc por medio de pequeñas extensiones, es uno de los simuladores que mayor prestaciones da para realizar una simulación de redes de sensores.

2.5.2 Simulador NS-2, Características y Funcionamiento

Ns-2 (Network Simulator) (5) es un software simulador de redes tanto cableadas como inalámbricas gobernado por acontecimientos y orientado a objetos. El Simulador Ns-2 en sus inicios fue desarrollado en los laboratorios de investigación de la Universidad de Berkeley con el fin de realizar estudios de la conducta de una red de telecomunicaciones. Se fundamenta en el protocolo IP, con protocolos de transporte TCP y UDP, protocolos para la gestión de la congestión como RAP y TFRC, así como mecanismos y procedimientos para la gestión de colas como Droptail, RED (Random Early Detection) y CBQ, asimismo de algoritmos de enrutamiento, de multicasting y finalmente, algunos protocolos MAC para simular redes de tipo LAN, WLAN.

Ns-2 nació como variante de simulador REAL en el año de 1989 (5), en los últimos años ha cambiado mucho mejorando notablemente aun así el Ns-2 no es un software totalmente terminado ni totalmente operativo. Uno de las principales razones por las que el simulador ha ganado popularidad en los campos de investigación se debe a la licencia GPL que posee, al tener este tipo de licencia el código inicial está disponible en Internet y puede ser modificado bajo los parámetros que implica la licencia GPL, claro está que el simulador deberá ser compilado bajo una de las distribuciones de Linux.

El simulador se desarrolló básicamente bajo dos tipos de usuarios, los que se interesan en realizar simulaciones bajo este entorno y los que están interesados en desarrollar nuevos códigos a partir del ya realizado. Ns-2 utiliza dos lenguajes de programación el C++ y el OTcl.

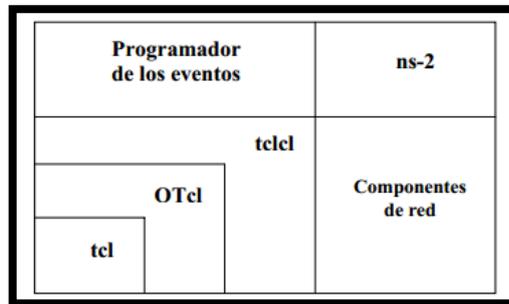
C++ es el lenguaje compilado con el que se realiza la gran mayoría de los modelos de objetos que se usan en las simulaciones, al ser un lenguaje compilado presenta mayor velocidad y eficiencia.

OTcl, es un lenguaje interpretado; deriva del Tcl (Tool Command Language) con extensión orientado a objetos. Se lo utiliza generalmente para realizar la redacción del script con la programación de todos los acontecimientos que se llevaran a cabo en el escenario de simulación, se entiende por acontecimientos los mandos para encender o apagar el tráfico en la red, la topología definida y la conexión entre los objetos de la simulación.

Cuando se pone en funcionamiento la simulación trabajan a la par dos jerarquías de objetos tanto C++ como Otcl, entre los objetos existe una correspondencia de uno a uno; la interfaz entre os objetos antes mencionados es realizada por tclcl.

El simulador Ns-2 posee una arquitectura estructural que se presenta a continuación en la figura II.XXVIII:

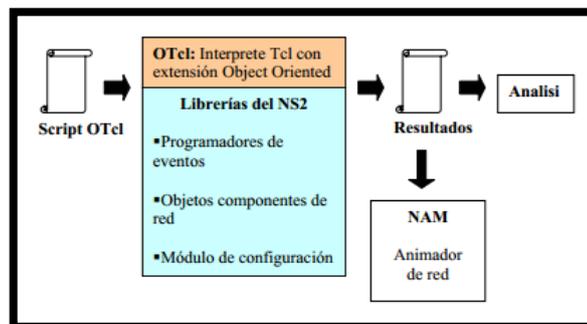
Figura II.XXVIII. Arquitectura estructural Ns-2



Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11306/fichero/TEORIA%252F10+--+Capitulo+5.pdf>

En la figura II.XXIX se visualiza la forma en como el usuario observa la manera de funcionamiento en conjunto del Software Ns-2

Figura II.XXIX. Visualización del usuario a Ns-2



Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11306/fichero/TEORIA%252F10+--+Capitulo+5.pdf>

La simulación en Ns-2 se modela como una sucesión de acontecimientos donde el programador tiene trazas del tiempo actual de simulación, y de la lista de eventos asociados, ocupándose de seleccionar el siguiente acontecimiento hasta al final del script. El simulador no soporta procesos con más flujos de control es decir multi-hilos, por tanto, la ejecución de los eventos se suceden de manera secuencial. La unidad de tiempo usada es el segundo, la precisión es la de las variables double. La comunicación entre los objetos de la red viene a través del intercambio de paquetes.

2.5.3 Ejecución de Simulaciones en NS-2

Para realizar la creación y ejecución de simulaciones dentro del entorno de simulación del software NS-2 se deben cumplir los siguientes pasos:

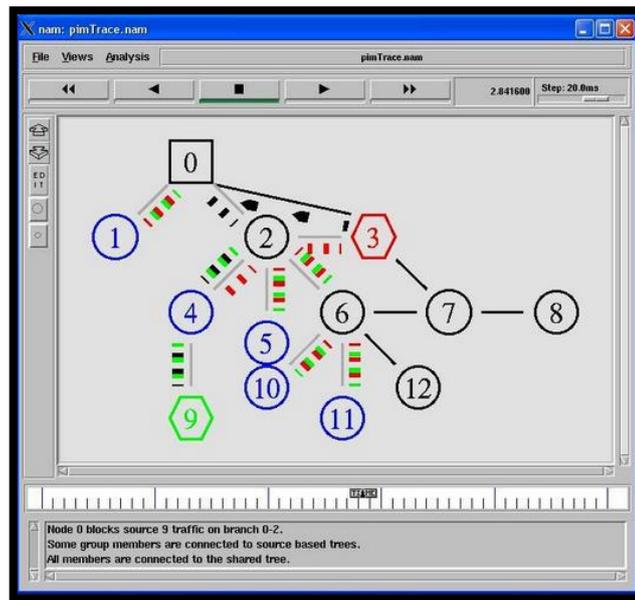
- Creación del escenario de simulación
- La ejecución de la simulación
- La obtención de resultados

La **creación del escenario** consiste en generar un fichero en el cual se integren todos los parámetros y características de la red que se quiere simular, es decir en este archivo se debe encontrar todas las configuraciones necesarias para que una simulación se pueda realizar. El archivo de configuración de la simulación debe estar en formato *"tcl"*, que es el formato aceptado por NS-2 para realizar las configuraciones de variables, funciones y objetos de la simulación. Ejemplo: *"simulación.tcl"*

Para la **ejecución de la simulación** previamente construida en el archivo tcl de simulación es necesario mediante el comando *"ns"* generar la simulación. Ejemplo: `#ns simulación.tcl`

Con la ejecución de este comando se obtendrá la generación de dos archivos, el primer archivo pertenece al código que se puede ejecutar para obtener la simulación gráfica del escenario mediante a herramienta NAM del simulador, el cual tiene una extensión *"nam"*, ejemplo: `simulación_grafica.nam`. En la figura II.XXX se puede observar la ejecución de la interfaz gráfica Nam para la visualización de una simulación en NS-2.

Figura II.XXX. Interfaz Gráfica NS-2



Fuente: <http://marco.uminho.pt/~joao/pim-ns2/>

El segundo archivo generado por la ejecución de la simulación es perteneciente a los resultados generados por NS-2, este archivo contiene todas las trazas de valores que el simulador genere en base a eventos ocurridos durante todo el intervalo de tiempo de la simulación, el archivo es generado en extensión “tr”, ejemplo: resultados.tr.

Para la **obtención de resultados** es necesario generar filtros para obtener solo los resultados deseados, ya que el archivo *resultados.tr* contiene todas las trazas realizadas por el simulador durante los eventos de la red, en este archivo se puede visualizar una gran cantidad de valores obtenidos por el simulador pero que no pueden ser de interés, para estos casos es necesario aplicar filtros que obtengan solo la información requerida de la simulación, por ejemplo si solo se requiere saber el tráfico producido por un nodo en específico o por un conjunto de nodos.

De esta manera es posible realizar simulaciones de las cuales se requiere obtener cierta información sobre el desempeño o rendimiento de una red inalámbrica. Para el presente caso de estudio se utilizaran solo los resultados del simulador NS-2 sobre el tráfico de paquetes y consumo energético que se dan en la simulación de una Red de Sensores Inalámbrica.

CAPITULO III

EVALUACIÓN DE LA RED SENSORIAL INALÁMBRICA

3.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar la evaluación de la Red Sensorial Inalámbrica es importante tener en cuenta el escenario y sus características en el cual se va a implementar la WSN, al ser un sistema de detección de incendios forestales, el sistema está destinado a implementarse en áreas forestales las cuales entre sus principales características se destacan en ser áreas muy extensas que cubren varios kilómetros cuadrados a lo largo de su superficie lo cual implica tener niveles altos de cobertura y conectividad entre los nodos que se encuentre dentro de la red. Estas áreas se identifican principalmente por su densidad de flora, la presencia abundante de árboles y vegetación de mediano tamaño que influye en los niveles de propagación de la señal que puede tener la Red Sensorial Inalámbrica.

Además otra característica muy importante es que el recurso energético es limitado o nulo en este tipo de áreas, lo cual requiere que la red tenga un sistema de alimentación independiente mediante el uso de baterías en cada uno de sus nodos por lo cual el consumo energético debe ser utilizado de

manera eficiente. Bajo estas características en esta investigación se decidió tomar en cuenta para la evaluación de cada versión de Zigbee las siguientes variables de estudio:

- Cobertura
- Eficiencia energética
- Tráfico

Los valores de cobertura podrán ser evaluados en base a los niveles de pérdidas y señal recibida en el enlace inalámbrico que tiene cada versión. Posteriormente mediante el uso de simulaciones computacionales se obtendrá los valores de tráfico y consumo energético que presenta cada versión en su simulación. Todos estos resultados servirán finalmente para evaluar cuál es la mejor versión de la tecnología Zigbee para ser usada en el diseño e implementación de una Red de Sensores Inalámbrica para áreas forestales.

3.2 Evaluación de Cobertura

En base al objeto de estudio, el cual tiene como finalidad encontrar la mejor versión de Zigbee para el diseño de una WSN para sistemas de prevención de incendios forestales, es de vital importancia realizar un análisis tanto de ganancias, potencias y pérdidas que se presentan en cada una de las versiones de Zigbee, dado que la obtención de los valores que se consiguen del análisis nos permitirá evaluar que versión cumple con los mejores parámetros de cobertura para el diseño e implementación de la red inalámbrica.

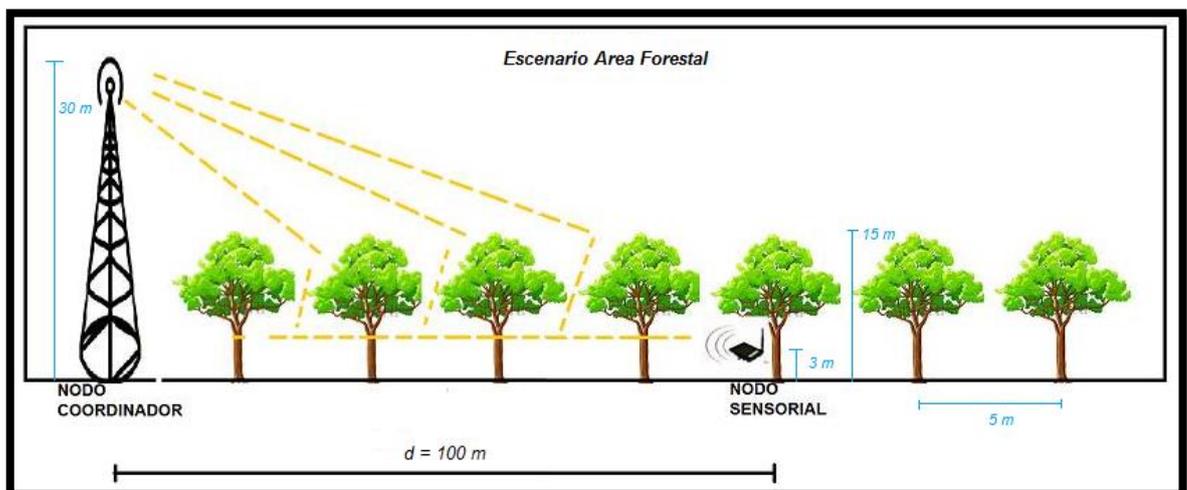
Para la evaluación de la cobertura de la WSN es necesario saber qué modelo de propagación se manejará, para este caso de estudio el análisis de propagación más adecuado para el tipo de escenario que se presenta es el **Modelo de Weissberger** (10). Mediante el uso de este modelo de predicción de pérdidas para Áreas Forestales, se realizará el análisis teórico de pérdidas y potencia recibida que tiene cada versión de Zigbee según la información de sus características y parámetros que presenta el área forestal.

3.2.1 Análisis de Propagación de las versiones Zigbee

Con el uso del Modelo de Predicción de Weissberger (10), así como de los conocimientos sobre comunicaciones inalámbricas se realizó el cálculo teórico de los valores de Perdidas del enlace y Potencia recibida que tiene las versiones: Xbee Series 2, Xbee Pro 2,4Ghz y Xbee Pro 900Mhz, considerando que para cada análisis se realizó el cálculo del enlace inalámbrico entre un Nodo Coordinador y un Nodo Sensorial. Para realizar el análisis de cada versión se definirá un escenario con los siguientes parámetros:

- El Nodo Coordinador se encontrara en la estación base de la Red a una altura de 30 metros y el Nodo Sensorial estará dentro del área forestal ubicado a una altura de 3 metros
- La distancia entre el nodo coordinador y el nodo sensorial será de 100 metros.
- El tamaño de los árboles se definirá en base al rango de altura de los árboles la cual se establece entre 7 y 16 metros y el espacio promedio que existe entre cada árbol será de 5 metros. Todos estos parámetros se pueden observar en la figura III.XXXI, y fueron obtenidos en base a las mediciones de los bosques de prueba descritos en el apartado 4.6.1:

Figura III.XXXI. Escenario Área Forestal



Fuente: Los Autores

A continuación se detalla el análisis de cada versión.

3.2.1.1 Análisis de propagación versión: Xbee Serie 2

Para el desarrollo del análisis de propagación de la versión Xbee Serie 2, los parámetros iniciales que se obtienen de la información mostrada del datasheet o ficha de datos del módulo inalámbrico servirán como base para los cálculos de dicho análisis. Estos parámetros se muestran a continuación en las tablas III.IX y III.X:

Tabla III.IX. Ficha de datos Xbee Series 2

Specification	Xbee Series 2
Performance	
Indoor / Urban Range	up to 133 ft (40m)
Outdoor RF line -of - sight Range	up to 400 ft (120m)
Transmit Power Output (Software selectable)	2mW (+3dBm)
RF Data Rate	250 000 bps
Serial Interface Data Rate (Software selectable)	1200 - 230400 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-95 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements	
Supply Voltage	2,8 - 3,4 V
Operating Current (Transmit)	40mA (@3,3 V)
Operating Current (Receive)	40mA (@3,3 V)
Power - down Current	< 1uA @ 25° C
General	
Operating Frequency Band	ISM 2,4 GHz
Dimensions	0,960" x 1,067" (2,438cm x 2,761 cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector

Fuente: www.digi.com

Tabla III.X. Ganancias Antenas Xbee Series 2

Type (Description)	Gain
Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 4.5"	2,1 dBi
Dipole (Articulated RPSMA)	2,1 dBi
Dipole (Half-wave articulated bulkhead mount U.FL. w/5" pigtail)	2,1 dBi
Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 5,25"	2,1 dBi
Monopole (Integrated whip)	2,1 dBi

Fuente: www.digi.com

Mediante la información obtenida por el datasheet del módulo sobre los valores de potencia de transmisión, ganancia de las antenas y frecuencia de operación, se realizará los cálculos para obtener las pérdidas del enlace inalámbrico y posteriormente encontrar la potencia recibida en el enlace.

Cálculo de Perdidas (dB) por Follaje del Área Forestal:

Frecuencia del enlace inalámbrico: $f = 2,4 \text{ GHz}$

El valor de la profundidad del bosque viene dado mediante la diferencia de la altura promedio de los árboles del bosque establecido para este cálculo en 15 metros y la altura a la cual se ubicara el Nodo Sensorial la cual es 3 metros:

$$P_{bosque} = h_{arbol} - h_{nodo Rx}$$

$$P_{bosque} = 15(m) - 3(m)$$

$$P_{bosque} = 12 \text{ metros}$$

Perdidas por el Follaje del Área Forestal mediante Modelo de Weissberger:

$$L_W(dB) = 1,33 * f^{0,284} * p_{bosque}^{0,588}$$

$$L_W(dB) = 7,352 \text{ dB.}$$

Las pérdidas por espacio libre calculadas mediante el modelo de Friss está dada en base la frecuencia expresada en MHz y la distancia del enlace en Km:

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 * Lg_{10}(Frecuencia) + 20 * Lg_{10}(Distancia)$$

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 * Lg_{10}(2400) + 20 * Lg_{10}(0,100)$$

$$L_0(dB) = 80 \text{ dB}$$

Cálculo total de las pérdidas en el enlace inalámbrico:

Las pérdidas totales L_{total} se obtienen de la sumatoria de las pérdidas producidas por el enlace inalámbrico en el espacio libre $L_0(dB)$, más las perdidas obtenidas por el follaje de área forestal $L_W(dB)$, más el valor de pérdidas por la presencia de hojas establecido en el modelo de Weissberger con un valor de 4 dB descrito en el apartado 2.4.2 para este análisis.

$$L_{total}(dB) = L_0(dB) + L_W(dB) + L_{hojas}(dB)$$

$$L_{total}(dB) = 80 (dB) + 7,352 (dB) + 4(dB)$$

$$L_{total}(dB) = 91,352 dB.$$

Cálculo de la Potencia Recibida en el enlace inalámbrico:

Para obtener la potencia recibida P_{Rx} en el Nodo Sensorial o Equipo Receptor se debe realizar un balance de potencias en base a los valores que tiene la Versión Xbee Serie 2:

$$Potencia_{Transmisor} = 2mW = 3 dBm$$

$$Ganancia_{Tx} = 2,1 dBi$$

$$Ganancia_{Rx} = 2,1 dBi$$

Balance de Potencias:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{total}$$

$$P_{Rx} = 3dBm + 2,1dB + 2,1dB - 91.352dB$$

$$P_{Rx} = -84,152 dBm$$

Para obtener los resultados con las restantes medidas de altura que pueden tener los arboles del bosque se realiza el mismo procedimiento, todos los resultados se pueden visualizar en el apartado 3.2.2

3.2.1.2 Análisis de propagación versión: Xbee Pro 2,4GHz

Para el desarrollo del análisis de propagación de la versión Xbee Pro 2,4GHz, los parámetros iniciales que se obtienen de la información mostrada del datasheet o ficha de datos del módulo inalámbrico servirán como base para los cálculos de dicho análisis. Estos parámetros se muestran a continuación en las tablas III.XI y III.XII:

Tabla III.XI. Ficha de datos Xbee Pro 2,4GHz

Specification	Xbee Pro
Performance	
Indoor / Urban Range	up to 300 ft (90m), up to 200 ft (60m) International variant
Outdoor RF line -of -sight Range	up to 1 mile (1600m), up to 2500 ft (750m) International variant
Transmit Power Output (Software selectable)	63mW (18dBm)*
RF Data Rate	250 000 bps
Serial Interface Data Rate	1200 - 230400 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-100 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements	
Supply Voltage	2,8 - 3,4 V
Transmit Current (typical)	250 mA (@3,3 V) (150 mA for International variant) RPSMA module only: 340 mA (@3,3 V) (180mA for International variant)
Idle / Receive Current (typical)	55 mA (@3.3 V)
Power - down Current	< 10 μ A
General	
Operating Frequency Band	ISM 2,4 GHz
Dimensions	0,960" x 1,297" (2,438cm x 3,294 cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (Industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector

Fuente: www.digi.com

Tabla III.XII. Ganancias Antenas Xbee Pro 2,4GHz

Type (Description)	Gain
Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 4.5"	2,1 dBi
Dipole (Articulated RPSMA)	2,1 dBi
Dipole (Half-wave articulated bulkhead mount U.FL. w/5" pigtail)	2,1 dBi
Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 5,25"	2,1 dBi
Monopole (Integrated whip)	2,1 dBi

Fuente: www.digi.com

Mediante la información obtenida por el datasheet del módulo sobre los valores de potencia de transmisión, ganancia de las antenas y frecuencia de operación, se realizará los cálculos para obtener las pérdidas del enlace inalámbrico y posteriormente encontrar la potencia recibida en el enlace.

Cálculo de Perdidas (dB) por Follaje del Área Forestal:

Frecuencia del enlace inalámbrico: $f = 2,4 \text{ GHz}$

El valor de la profundidad del bosque viene dado mediante la diferencia de la altura promedio de los árboles del bosque establecido en 15 metros para este cálculo y la altura a la cual se ubicara el Nodo Sensorial la cual es 3 metros:

$$P_{bosque} = h_{arbol} - h_{nodo \text{ Rx}}$$

$$P_{bosque} = 15(m) - 3(m)$$

$$P_{bosque} = 12 \text{ metros}$$

Perdidas por el Follaje del Área Forestal mediante Modelo de Weissberger:

$$L_W(dB) = 1,33 * f^{0,284} * p_{bosque}^{0,588}$$

$$L_W(dB) = 7,352 \text{ dB.}$$

Las pérdidas por espacio libre calculadas mediante el modelo de Friss está dada en base la frecuencia expresada en MHz y la distancia del enlace en Km:

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 * Lg_{10}(Frecuencia) + 20 * Lg_{10}(Distancia)$$

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 * Lg_{10}(2400) + 20 * Lg_{10}(0,100)$$

$$L_0(dB) = 80 \text{ dB}$$

Cálculo total de las pérdidas en el enlace inalámbrico:

Las pérdidas totales L_{total} se obtienen de la sumatoria de las pérdidas producidas por el enlace inalámbrico en el espacio libre $L_0(dB)$, más las pérdidas obtenidas por el follaje de área forestal $L_W(dB)$, más el valor de pérdidas por la presencia de hojas establecido en el modelo de Weissberger con un valor de 4 dB descrito en el apartado 2.4.2 para este análisis.

$$L_{total}(dB) = L_0(dB) + L_W(dB) + L_{hojas}(dB)$$

$$L_{total}(dB) = 80 (dB) + 7,352 (dB) + 4(dB)$$

$$L_{total}(dB) = 91,352 \text{ dB.}$$

Cálculo de la Potencia Recibida en el enlace inalámbrico:

Para obtener la potencia recibida en el Nodo Sensorial o Equipo Receptor se debe realizar un balance de potencias en base a los valores que tiene la Versión Xbee Pro 2,4GHz:

$$Potencia_{Transmisor} = 63mW = 18 dBm$$

$$Ganancia_{Tx} = 2,1 dBi$$

$$Ganancia_{Rx} = 2,1 dBi$$

Balance de Potencias:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{total}$$

$$P_{Rx} = 18dBm + 2,1dB + 2,1dB - 91,352dB$$

$$P_{Rx} = -69,152 dBm.$$

Para obtener los resultados con las restantes medidas de altura que pueden tener los arboles del bosque se realiza el mismo procedimiento, todos los resultados se pueden visualizar en el apartado 3.2.2

3.2.1.3 Análisis de propagación versión: Xbee Pro 900MHz

Para el desarrollo del análisis de propagación de la versión Xbee Pro 900MHz, los parámetros iniciales que se obtienen de la información mostrada del datasheet o ficha de datos del módulo inalámbrico servirán como base para los cálculos de dicho análisis. Estos parámetros se muestran a continuación en las tablas III.XIII y III.XIV:

Tabla III.XIII. Ficha de datos Xbee Pro 900MHz

Specification	Xbee Pro 900
Performance	
Indoor / Urban Range	up to 450 ft (140m)
Outdoor RF line -of - sight Range	up to 1.8 mile (3km) w/2.1 dB dipole antenna up to 6 miles (10km) w/high gain antenna
Transmit Power Output (Software selectable)	+ 17 dBm (50mW)
RF Data Rate	156.25kbps
Serial Interface Data Rate (Software selectable)	3.3V CMOS Serial UART (5V tolerant UART)
Receiver Sensitivity	-100 dBm
Power Requirements	
Supply Voltage	3,0 - 3,6 VDC
Operating Current	210 mA, (150 mA typical)
Operating Current (Receive)	80 Ma
Sleep Current	60 µA typical @ 3,3 V
General	
Operating Frequency Band	902-928 MHz (ISM)
Dimensions	0,962" x 1,312" (2,443cm x 3,332 cm)
Operating Temperature	-40 to 85 C (Industrial), 0 to 95 % non-condensing
Antenna Options	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector

Fuente: www.digi.com

Tabla III.XIV. Ganancias Antenas Xbee Pro 900MHz

Type (Description)	Gain
Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 4.5"	2,1 dBi
Dipole (Articulated RPSMA)	2,1 dBi
Dipole (Half-wave articulated bulkhead mount U.FL. w/5" pigtail)	2,1 dBi
Dipole (Half-wave articulated RPSMA - 5,25"	2,1 dBi
Monopole (Integrated whip)	2,1 dBi

Fuente: www.digi.com

Mediante la información obtenida por el datasheet del módulo sobre los valores de potencia de transmisión, ganancia de las antenas y frecuencia de operación, se realizará los cálculos para obtener las pérdidas del enlace inalámbrico y posteriormente encontrar la potencia recibida en el enlace.

Cálculo de Perdidas (dB) por Follaje del Área Forestal:

Frecuencia del enlace inalámbrico: $f = 902 \text{ MHz}$

El valor de la profundidad del bosque viene dado mediante la diferencia de la altura promedio de los árboles del bosque establecido en 15 metros para este cálculo y la altura a la cual se ubicara el Nodo Sensorial la cual es 3 metros:

$$P_{bosque} = h_{arbol} - h_{nodo Rx}$$

$$P_{bosque} = 15(m) - 3(m)$$

$$P_{bosque} = 12 \text{ metros}$$

Perdidas por el Follaje del Área Forestal mediante Modelo de Weissberger:

$$L_W(dB) = 1,33 * f^{0,284} * p_{bosque}^{0,588}$$

$$L_W(dB) = 5,564 \text{ dB.}$$

Las pérdidas por espacio libre calculadas mediante el modelo de Friss está dada en base la frecuencia expresada en MHz y la distancia del enlace en Km:

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 * Lg_{10}(Frecuencia) + 20 * Lg_{10}(Distancia)$$

$$L_0(dB) = 32,4 + 20 * Lg_{10}(902) + 20 * Lg_{10}(0,100)$$

$$L_0(dB) = 71,50 \text{ dB}$$

Cálculo total de las pérdidas en el enlace inalámbrico:

Las pérdidas totales L_{total} se obtienen de la sumatoria de las pérdidas producidas por el enlace inalámbrico en el espacio libre $L_0(dB)$, más las pérdidas obtenidas por el follaje de área forestal $L_W(dB)$, más el valor de pérdidas por la presencia de hojas establecido en el modelo de Weissberger con un valor de 4 dB descrito en el apartado 2.4.2 para este análisis.

$$L_{total}(dB) = L_0(dB) + L_W(dB) + L_{hojas}(dB)$$

$$L_{total}(dB) = 71,50 (dB) + 5,564 (dB) + 4(dB)$$

$$L_{total}(dB) = 81,064 \text{ dB.}$$

Cálculo de la Potencia Recibida en el enlace inalámbrico:

Para obtener la potencia recibida P_{Rx} en el Nodo Sensorial o Equipo Receptor se debe realizar un balance de potencias en base a los valores que tiene la Versión Xbee Pro 900MHz:

$$Potencia_{Transmisor} = 50mW = 17 dBm$$

$$Ganancia_{Tx} = 2,1 dBi$$

$$Ganancia_{Rx} = 2,1 dBi$$

Balance de Potencias:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{total}$$

$$P_{Rx} = 17dBm + 2,1dB + 2,1dB - 81,064 dB$$

$$P_{Rx} = -59,864 dBm.$$

Para obtener los resultados con las restantes medidas de altura que pueden tener los arboles del bosque se realiza el mismo procedimiento, todos los resultados se pueden visualizar en el apartado 3.2.2

3.2.2 Resultados de análisis de propagación

Todos los resultados de cada versión obtenidos a partir de los cálculos realizados en base a las diferentes alturas que puede tener un árbol del rango especificado para el análisis de propagación se pueden visualizar en las tablas III.XV, III.XVI, III.XVII. Se realizó un total de 10 cálculos por cada versión.

Tabla III.XV. Resultados Análisis de propagación Xbee Serie 2

Versión Xbee Serie 2				
Medida altura arboles (metros)	Perdidas por Follaje (dB)	Perdidas Espacio Libre (dB)	Perdidas Total Enlace (dB)	Potencia Recibida (dBm)
7	3,851	80	87,851	-80,651
8	4,392	80	88,392	-81,192
9	4,889	80	88,889	-81,689
10	5,353	80	89,353	-82,153
11	5,79	80	89,79	-82,59
12	6,206	80	90,206	-83,006
13	6,602	80	90,602	-83,402
14	6,983	80	90,983	-83,783
15	7,352	80	91,352	-84,152
16	7,704	80	91,704	-84,504

Fuente: Los Autores

Tabla III.XVI. Resultados Análisis de propagación Xbee Pro 2,4 GHz

Versión Xbee Pro 2,4 GHz				
Medida altura arboles (metros)	Perdidas por Follaje (dB)	Perdidas Espacio Libre (dB)	Perdidas Total Enlace (dB)	Potencia Recibida (dBm)
7	3,851	80	87,851	-65,651
8	4,392	80	88,392	-66,192
9	4,889	80	88,889	-66,689
10	5,353	80	89,353	-67,153
11	5,79	80	89,79	-67,59
12	6,206	80	90,206	-68,006
13	6,602	80	90,602	-68,402
14	6,983	80	90,983	-68,783
15	7,352	80	91,352	-69,152
16	7,704	80	91,704	-69,504

Fuente: Los Autores

Tabla III.XVII. Resultados Análisis de propagación Xbee Pro 900 MHz

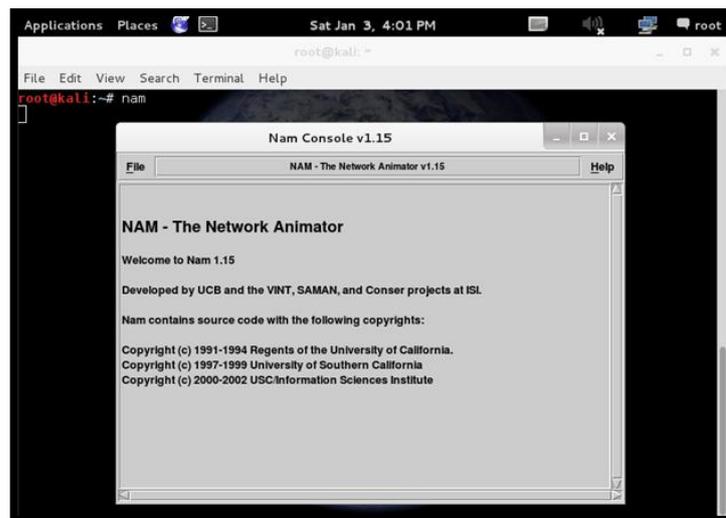
Versión Xbee Pro 900 MHz				
Medida altura arboles (metros)	Perdidas por Follaje (dB)	Perdidas Espacio Libre (dB)	Perdidas Total Enlace (dB)	Potencia Recibida (dBm)
7	2,917	71,5	78,417	-57,217
8	3,325	71,5	78,825	-57,625
9	3,702	71,5	79,202	-58,002
10	4,053	71,5	79,553	-58,353
11	4,384	71,5	79,884	-58,684
12	4,699	71,5	80,199	-58,999
13	4,999	71,5	80,499	-59,299
14	5,287	71,5	80,787	-59,587
15	5,564	71,5	81,064	-59,864
16	5,833	71,5	81,333	-60,133

Fuente: Los Autores

3.3 Evaluación de eficiencia energética y tráfico

Para la realización de las simulaciones computacionales para la evaluación de las variables de eficiencia energética y tráfico de la WSN de esta investigación se ha decidido utilizar el Software Simulador NS-2 en su versión 2.34.

Figura III.XXXII. Simulador NS-2 ejecutado en Linux



Fuente: Los Autores

3.3.1 Creación de ambiente de simulación

Para la realización de las simulaciones mediante el software de simulación NS-2, se tiene que generar un archivo de configuración en el cual se tiene que establecer cada uno de los componentes que intervienen dentro de la estructura de simulación, los cuales se dividen de la siguiente manera:

- Parámetros de simulación
- Configuración del simulador
- Configuración de los nodos de la red
- Configuración de los agentes de tráfico de la red

Dentro del entorno del simulador NS-2 para la definición de cada componente es necesario que la creación del archivo de simulación sea generado con extensión .tcl como se indicó en el apartado 2.5.3, en el cual se debe establecer cada componente necesarios para la realización de la simulación de una WSN basada en el estándar 802.15.4, una vez especificado cada componente se puede realizar su ejecución y obtener las trazas o resultados que genera el simulador NS-2.

3.3.2 Parámetros de simulación

Los parámetros previos mediante los cuales se va a evaluar cada versión para la creación de un escenario específico de simulación son ingresados en el archivo de simulación de NS-2. A continuación se describe cada parámetro y su configuración dentro del archivo de simulación:

Topología de red: Para la elección de qué tipo de topología se debe utilizar para realizar la simulación, se ha tomado en cuenta la principal característica del escenario real de implementación del sistema, el cual es un área forestal que se identifica principalmente por su dimensión y estrictos niveles de consumo de energía.

Una de las principales dificultades que se presentan en los bosques es tratar de cubrir toda el área que implique ser monitoreada. La principal característica de la topología en árbol, es que se establecen caminos entre nodos de una red para transmitir la información hacia un nodo final o nodo concentrador, esto

permite alargar de manera significativa los niveles de cobertura que puede tener la WSN a comparación de la topología en estrella donde cada nodo final se conecta hacia un solo nodo concentrador, por lo que se tiene un rango limitado de alcance de cobertura en la red.

Debido a que el área forestal es un escenario hostil en cuanto al nivel de consumo de energía que debe manejar cada nodo, la topología en Malla se convierte en una topología no adecuada para la implementación de este tipo de escenarios, ya que una de las principales necesidades que tiene la red es el consumo mínimo de energía de cada nodo, el tener un número mayor de enlaces y transmisiones entre nodos aumentaría el consumo de energía de un nodo en una manera elevada. La topología en árbol se caracteriza por el reenvío de datos hacia un nodo específico lo que permite que el consumo de energía sea utilizado de manera eficiente. En conclusión la **topología en Árbol** se convierte en la mejor opción para ser utilizada como la topología de simulación e implementación de la WSN en este tipo de escenarios.

La configuración de este parámetro dentro del simulador se precisa mediante la definición de los nodos finales, nodo coordinador y la creación de los agentes de tráfico de la red que se encuentra descrito en los apartados 3.3.3 y 3.3.4.

Parámetros base de cada versión Zigbee: Para realizar cada simulación es necesario establecer los parámetros base que tiene cada versión como son:

- Potencia transmitida
- Potencia recibida
- Umbral de recepción (Sensibilidad)
- Frecuencia y canal de operación.

Esta información es obtenida del análisis de propagación realizado previamente y el datasheet de cada versión y dentro del archivo de simulación cada parámetro se establece de la siguiente manera:

```
Phy/WirelessPhy set CStresh_ (Valor en mW)
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ (Valor en mW)
Phy/WirelessPhy set CPThresh_ (Valor Entero)
Phy/WirelessPhy set freq_ (Valor en Hz)
-channel $chan_1_
-txPower (Valor en mW)
```

En donde *CStresh_* es el valor del umbral de recepción que tiene el nodo (sensibilidad del receptor), y su valor debe estar expresado en miliwatts. *RXThresh_* es el valor de la potencia recibida o intensidad de señal que llega al receptor y su valor debe estar expresado en miliwatts. *CPThresh_* es el valor referente a la captura de paquetes, en el caso de que se reciban dos paquetes simultáneamente, se debe recibir el paquete con mejor intensidad de señal, es decir si *CPThresh_* tiene un valor entero de 10, se recibe el paquete que sea diez veces mayor en su intensidad que cualquier otro paquete; caso contrario, ambos paquetes se pierden en la colisión. El valor *freq_* y *-channel* hacen referencia al valor de la frecuencia y el canal que está utilizando el enlace inalámbrico. Finalmente el valor de *-txPower* es el valor de la potencia transmitida por un nodo expresado en miliwatts.

Parámetros base del simulador NS-2: Existen varios parámetros que se deben establecer para especificar la simulación de una WSN dentro del software NS-2 como son:

- Tipo de canal
- Tipo de estándar
- Tipo de interfaz
- Tipo de antena para el nodo
- Características del protocolo
- Numero de nodos
- Tipo de tráfico
- Distancia entre los nodos

Estos parámetros deben ser configurados como variables de uso global en el inicio del archivo de configuración de la simulación, como se muestra a continuación:

```
set val(chan)           Channel/WirelessChannel           ;# Tipo de canal
set val(netif)          Phy/WirelessPhy/802_15_4          ;# Tipo de Estandar capa física
set val(mac)            Mac/802_15_4                    ;# Tipo de Estandar capa MAC
set val(ifq)            Queue/DropTail/PriQueue          ;# Tipo de interfaz
set val(ant)            Antenna/OmniAntenna              ;# Modelo de antena
set val(ifqlen)         150                              ;# Máximo de paquetes en ifq
set val(nn)             11                              ;# Número de nodos
set val(rp)             AODV                             ;# Protocolo de enrutamiento
set val(x)              100                             ;# Distancia entre nodos
set val(y)              100
set val(traffic)        cbr                             ;# Tráfico UDP/CBR
```

Como se puede visualizar se especifica que el tipo de canal es inalámbrico y el estándar para la red es el IEEE 802.15.4, así como los demás parámetros que definen las características de la WSN, en el cual están el número de nodos establecido en 10 nodos finales y un nodo coordinador. El valor de la distancia entre nodos establecido en 100 metros. El valor del tipo de antena establecido como omni-direccional y los parámetros para el tráfico de paquetes de la red.

Se debe indicar que los parámetros base que se establecen y pertenecen al simulador se mantienen constantes para todas las diferentes simulaciones de cada versión de Zigbee, los únicos valores que cambian dentro de la configuración de la simulación son los parámetros específicos que tiene cada versión.

3.3.3 Configuración de la simulación

Después de tener establecidos los parámetros de simulación se debe generar la configuración de la simulación en NS-2, en la cual se especifica los procesos que debe realizar el simulador para que se genere la simulación de una manera correcta.

El primer proceso que se debe especificar en el archivo .tcl de simulación de NS-2 es generar un nuevo escenario de simulación el cual se logra con las siguientes instrucciones:

```
set ns_      [new Simulator]
set tracefd  [open tree.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd
if { "$val(nam)" == "tree.nam" } {
    set namtrace [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
    $ns_ use-newtrace
}
.
```

Estas instrucciones permiten generar el archivo con extensión .tr el cual guarda todas las trazas y resultados de la simulación y el archivo .nam en el cual se genera todo el código del simulador para obtener la simulación grafica de los eventos que ocurren durante la simulación.

El siguiente proceso consiste en crear el espacio en donde se desarrolla la simulación y esto se logra mediante la generación del objeto *Topography*, además también se crea el objeto *god_*, que se encarga de la gestión de los enlaces de los nodos establecidos en el objeto *Topography*, esta configuración se logra mediante las siguientes instrucciones:

```
set topo      [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

set god_ [create-god $val(nn)]
set chan_1_ [new $val(chan)]
```

Finalmente el último proceso que se debe generar en la simulación es ajustar las trazas o líneas de resultado a un formato en el cual se puede obtener posteriormente los resultados deseados sobre el tráfico y consumo energético de la red para su análisis, esta configuración se logra mediante las siguientes instrucciones dentro del archivo de simulación:

```
$ns_ set WirelessNewTrace_ ON
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0
}
.
```

Una vez establecidos los procesos de la simulación, se debe definir las variables que se desea medir dentro de la simulación, para este caso de

estudio las variables de interés son el consumo energético y el tráfico generado dentro de la red de cada versión de Zigbee que se va a simular.

3.3.3.1 Consumo Energético

Para el análisis del consumo energético dentro de la simulación de la WSN, el simulador NS-2 hace uso de un modelo de consumo energético el cual se basa en las características que se configuran sobre el nodo de la red, en el cual se incluyen la energía inicial del nodo y potencia de transmisión:

```
-energyModel "EnergyModel"\  
  -initialEnergy 5760 \  
  -txPower 63 \  
  -channel $chan_1_
```

En el transcurso de la simulación el software simulador se encarga de realizar un cálculo del consumo de energía que se da en cada evento o suceso de cada nodo debido a la transmisión y recepción de datos y lo registra en una traza, estos valores van restando el valor de energía inicial del nodo, con lo cual al final de la simulación se obtiene el valor aproximado de energía consumida dentro de la red.

Estudios realizados anteriormente en la ESPOCH sobre WSN (15), determinan que con el uso de una batería de 9 VCC se tiene un equivalente de 5760 Julios de energía inicial acumulada en una batería, es de esta manera que para la realización de las simulaciones se tomara el valor de energía inicial de un nodo en 5760 J, lo cual supondría que cada nodo para su funcionamiento tiene acoplada una batería de 9 voltios de corriente continua.

El valor final de consumo energético vendrá dado en Julios y será la sumatoria del consumo de todos los nodos configurados en la simulación.

3.3.3.2 Tráfico

Para el análisis de tráfico los valores que se pueden obtener de la simulación mediante NS-2 son la tasa de paquetes de datos enviados, recibidos y paquetes perdidos dentro de la red, estos datos se pueden obtener del simulador mediante las trazas que genera el software por cada evento dentro

de la red y mediante estos valores obtener la tasa de entrega de paquetes y la tasa de transferencia (throughput) que tiene cada versión de Zigbee.

La tasa de entrega de paquetes es calculada mediante la relación que existe entre los paquetes enviados y los paquetes recibidos dentro de la red es así que se obtendrá el porcentaje de fiabilidad en la entrega de paquetes que tiene cada versión.

$$Tasa\ de\ entrega = \frac{Paquetes\ Recibidos}{Paquetes\ Enviados} * 100\%$$

El throughput se obtiene en base a la cantidad de datos que se puede enviar en un determinado tiempo, el simulador obtiene esta información en base a la cantidad de sucesos de transmisión o recepción de datos que ocurren en un intervalo de tiempo entre cada traza que se registra.

$$Throughput = \frac{Cantidad\ de\ datos}{Tiempo\ de\ Simulacion}$$

El valor del throughput vendrá dado en bites por segundo (bps). Todos los valores de tráfico se obtendrán mediante el filtrado de la información de cada traza que registra el simulador en su archivo de resultados .tr, con esto en la evaluación de cada versión de Zigbee obtendremos los valores que se generen por la actividad de tráfico de paquetes dentro de la red

3.3.4 Configuración de los nodos de la red

En la realización de la simulación de la WSN, se ha dispuesto la creación de 11 nodos dentro de la red, el primer nodo será el nodo coordinador y los diez nodos restantes serán nodos finales generadores de tráfico.

Para la creación de los nodos de la WSN se debe configurar dentro del archivo de simulación tanto las características del nodo para su funcionamiento así como la ubicación de cada nodo dentro del escenario de simulación, es así que para la configuración del nodo se deben incluir las siguientes líneas de comando dentro del archivo de simulación:

```
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \  
-llType $val(ll) \  
-macType $val(mac) \  
-ifqType $val(ifq) \  
-ifqLen $val(ifqlen) \  
-antType $val(ant) \  
-propType $val(prop) \  
-phyType $val(netif) \  
-topoInstance $topo \  
-agentTrace ON \  
-routerTrace ON \  
-macTrace ON \  

```

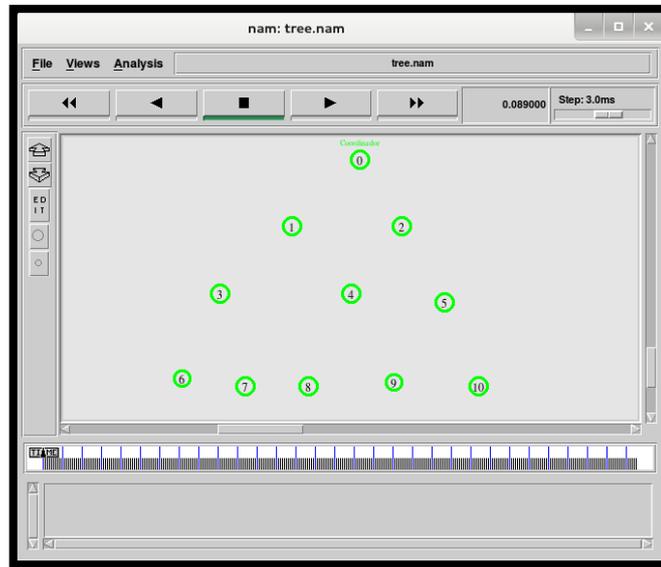
Los primeros parámetros hacen referencia a los valores que pertenecen a las características de la WSN asignados anteriormente en el archivo de simulación en el apartado 3.3.2 y que son asociados hacia cada nodo creado en la simulación. Los parámetros de “*agentTrace*” y “*routeTrace*” permiten habilitar la actividad en el nodo de envío y recepción de tráfico.

Para asignar la ubicación que va a tener cada nodo dentro del escenario de simulación se debe ingresar los valores en coordenadas de los planos x, y, z. La ubicación de cada nodo estará basada en la creación de una topología en Árbol. A continuación se puede ver las líneas de comando ingresadas en el archivo de simulación para los nodos de la red con sus respectivas coordenadas:

```
#Ubicación de los nodos  
$node_(0) set X_ 30  
$node_(0) set Y_ 40  
$node_(0) set Z_ 0  
$node_(1) set X_ 22  
$node_(1) set Y_ 32  
$node_(1) set Z_ 0  
$node_(2) set X_ 35  
$node_(2) set Y_ 32  
$node_(2) set Z_ 0  
$node_(3) set X_ 13.5  
$node_(3) set Y_ 24  
$node_(3) set Z_ 0  
$node_(4) set X_ 29  
$node_(4) set Y_ 24  
$node_(4) set Z_ 0  
$node_(5) set X_ 40  
$node_(5) set Y_ 23  
$node_(5) set Z_ 0  
$node_(6) set X_ 9  
$node_(6) set Y_ 14  
$node_(6) set Z_ 0  
$node_(7) set X_ 16.5  
$node_(7) set Y_ 13  
$node_(7) set Z_ 0  
$node_(8) set X_ 24  
$node_(8) set Y_ 13  
$node_(8) set Z_ 0  
$node_(9) set X_ 34  
$node_(9) set Y_ 13.5  
$node_(9) set Z_ 0  
$node_(10) set X_ 44  
$node_(10) set Y_ 13  
$node_(10) set Z_ 0  
$ns_ at 0.0 "$node_(0) NodeLabel Coordinador"  
$ns_ at 0.0 "$node_(0) sscs startPANCoord 1"
```

En donde se especifica que el nodo (0) será el coordinador, en la figura III.XXXIII se puede visualizar la distribución de cada nodo dentro del ambiente gráfico Nam del simulador NS-2.

Figura III.XXXIII. Ubicación de nodos en simulador



Fuente: Los Autores

3.3.5 Configuración de los agentes de tráfico de la red

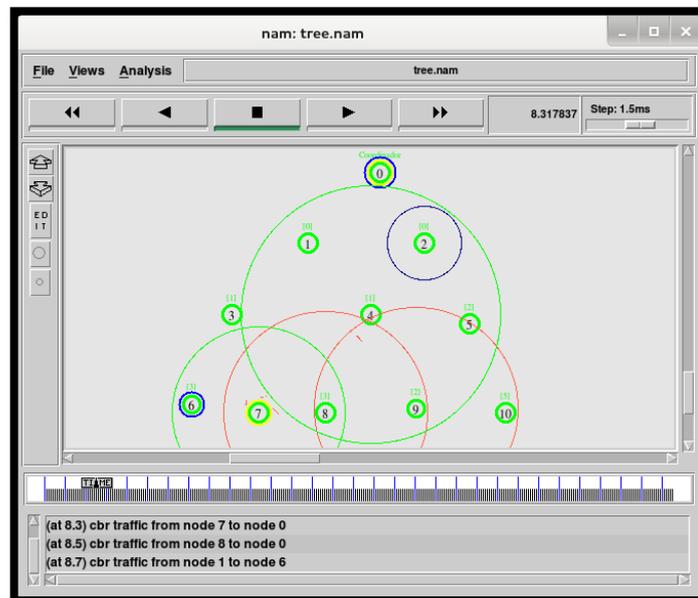
Una vez definido los parámetros de simulación de la WSN, las variables de análisis de la simulación y el número de nodos que se encuentran en la red, finalmente se debe configurar el tráfico que se debe generar en la red para su simulación, en este caso se debe configurar los agentes de tráfico para cada nodo y como se debe generar el tráfico UDP en la red. En las siguientes líneas de configuración se puede visualizar como está estructurado el tipo de tráfico y el flujo del mismo mediante los agentes de tráfico:

```
#Definición del trafico en la Red
$ns_ at 6.0 "$node_(3) sscs stopBeacon"
$ns_ at 8.0 "$node_(3) sscs startBeacon"
$ns_ at 9.0 "$node_(5) sscs startBeacon 4 4"
$ns_ at 10.0 "$node_(4) sscs stopBeacon"
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 3ms
$ns_ at $appTime1 "puts \"\nTransmision de datos..\n\"""

# Configuración de flujo de tráfico entre nodods
proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_
    set udp_($src) [new Agent/UDP]
    eval $ns_ attach-agent \ $node_($src) \ $udp_($src)
    set null_($dst) [new Agent/Null]
    eval $ns_ attach-agent \ $node_($dst) \ $null_($dst)
    set cbr_($src) [new Application/Traffic/CBR]
    eval \ $cbr_($src) set packetsize_ 150
    eval \ $cbr_($src) set interval_ $interval
    eval \ $cbr_($src) set random_ 0
    eval \ $cbr_($src) set maxpkts_ 10000
    eval \ $cbr_($src) attach-agent \ $udp_($src)
    eval $ns_ connect \ $udp_($src) \ $null_($dst)
    $ns_ at $starttime "$cbr_($src) start"
}
}
```

Para la topología en árbol se establece que el tráfico se debe generar en los nodos finales hacia el nodo coordinador, en la figura III.XXXIV se puede observar la parte gráfica de la generación de tráfico en el simulador NS-2 mediante la interfaz Nam.

Figura III.XXXIV. Simulación de tráfico NS-2



Fuente: Los Autores

Después de haber especificado cada parte de la estructura que debe tener el archivo de simulación de NS-2, se puede empezar a generar las simulaciones

para cada versión. Para cada simulación los únicos parámetros que cambian son los pertenecientes a características de la versión a evaluar, los demás parámetros se mantienen constantes durante todas las simulaciones que se realicen.

3.4 Simulación de las Versiones Zigbee

Para efectuar la evaluación de cada versión de Zigbee se realizará las simulaciones computacionales de cada versión con el escenario de una WSN descrito anteriormente en el apartado 3.3.1 Además se crearon los archivos de simulación para cada versión de Zigbee basándose en los parámetros de sensibilidad del receptor, la potencia transmitida y recibida así como la frecuencia de trabajo de cada versión.

3.4.1 Simulación de la Versión Xbee Serie 2

En el caso la versión Xbee Serie 2 se realizó la configuración y ejecución del archivo de simulación; de ésta forma se logró obtener valores de paquetes recibidos, paquetes enviados, la tasa de entrega de paquetes, el throughput que presenta la red así como el consumo energético.

A continuación se muestra la configuración del archivo de simulación de NS-2 con los parámetros de la versión Xbee serie 2 tomados en cuenta para la realización de la simulación.

3.4.1.1 Definición de variables

Para la definición de parámetros que describirán el modo de funcionamiento de la versión de Xbee Series 2 se trabajó con los siguientes valores obtenidos del análisis teórico del modelo de propagación de Weissberger así como también información del datasheet de la versión, en la tabla III.XVIII se muestra la conversión de potencias para la utilización dentro del archivo de simulación.

Tabla III.XVIII. Conversión de Parámetros Xbee Series 2

	<i>DBm</i>	<i>mW</i>
<i>Sensibilidad del Receptor</i>	-95	$3.16 e^{-10}$
<i>Potencia Recibida</i>	-84,152	$3.84 e^{-9}$

Fuente: Los Autores

Con la medida de las variables dadas en mW se procede a configurar en el CStresh la sensibilidad dada y en RXThresh la potencia recibida como se muestra:

```
Phy/wirelessPhy set CStresh_ 3.16e-10  
Phy/wirelessPhy set RXThresh_ 3.84e-09
```

Seguidamente se realiza la configuración de la frecuencia de trabajo dada en Hz:

```
Phy/wirelessPhy set freq_ 2.4e+09
```

Finalmente el consumo energético siendo uno de los factores primordiales de la transmisión de la señal se configura en el modelo de energía donde se establece la energía inicial del nodo, la potencia de transmisión en mW y el canal de transmisión:

```
-energyModel "EnergyModel"  
-initialEnergy 5760 \  
-txPower 0.2 \  
-channel $chan_1_
```

Luego de haber realizado esta serie de configuraciones se debe ejecutar el archivo de simulación para la obtención de la simulación gráfica y el archivo de trazas donde se encuentran los resultados.

El archivo completo de simulación "Simulacion_XbeeS2.tcl" de NS-2 de la versión Xbee Serie 2 se encuentra en el **anexo II**.

3.4.1.2 Obtención de resultados

Para conseguir los resultados de la simulación se usa un filtro que es capaz de mostrar solo la información que se necesita del archivo de trazas o resultados que genera el simulador, en este caso información de paquetes enviados, paquetes recibidos, tasa de entrega de paquetes, throughput y el consumo energético de la red.

En la tabla III.XIX se muestra los datos obtenidos del tráfico de paquetes de la Red de Sensores Inalámbrica.

Tabla III.XIX. Datos tráfico de paquetes Xbee Serie 2

Nro. Nodo	Paquetes enviados	Paquetes Recibidos
0	851	85
1	820	866
2	813	856
3	803	857
4	62	835
5	415	826
6	933	479
7	936	1284
8	932	503
9	944	523
10	929	509
TOTAL	8438	7623

Fuente: Los Autores

A continuación se muestra los resultados totales obtenidos sobre el tráfico y consumo energético de la simulación, véase tabla III.XX.

Tabla III.XX. Resultados simulación Xbee Series 2

<i>XBEE SERIES 2</i>	
<i>Total Paquetes Enviados:</i>	8438
<i>Total Paquetes Recibidos:</i>	7623
<i>Tasa de Entrega de Paquetes (%):</i>	90
<i>Throughput (Kbps):</i>	3.8115
<i>Consumo Energético(Julios):</i>	46649.382873

Fuente: Los Autores

Para el resto de simulaciones en base a los valores obtenidos del análisis del modelo de propagación se realizó el mismo procedimiento con el cual se obtuvo un total de 10 simulaciones para esta versión. Los resultados obtenidos de cada simulación se pueden visualizar en el apartado 3.5.

3.4.2 Simulación de la Versión Xbee Pro 2,4GHz

Al igual que la simulación de la versión de Xbee Series 2 se configurará los datos obtenidos a partir del análisis de propagación con el modelo de Weissberger e información del datasheet que caracteriza a la Versión Xbee Pro 2,4 GHz.

3.4.2.1 Creación del escenario

En la tabla III.XXI se muestra la conversión de potencias para la utilización dentro del archivo de simulación de NS-2.

Tabla III.XXI. Conversión de Parámetros Xbee Pro 2,4 GHz

	<i>DBm</i>	<i>mW</i>
<i>Sensibilidad de Receptor</i>	-100	$1 e^{-10}$
<i>Potencia Recibida</i>	-69,152	$121,56 e^{-9}$

Fuente: Los Autores

Con la medida de las variables dadas en mW se procede a configurar en el CStresh la sensibilidad dada y en RXThresh la potencia recibida como se muestra:

```
Phy/wirelessPhy set CStresh_ 1e-10  
Phy/wirelessPhy set RXThresh_ 121.56e-9
```

Seguidamente se realiza la configuración de la frecuencia de trabajo dada en Hz:

```
Phy/wirelessPhy set freq_ 2.4e+09
```

Finalmente el consumo energético siendo uno de los factores primordiales de la transmisión de la señal se configura en el modelo de energía donde se establece la energía inicial del nodo, la potencia de transmisión en mW y el canal de transmisión.

```
-energyModel "EnergyModel"\  
-initialEnergy 5760 \  
-txPower 63 \  
-channel $chan_1_
```

Luego de haber realizado esta serie de configuraciones se debe ejecutar el archivo de simulación para la obtención de la simulación gráfica y el archivo de trazas donde se encuentran los resultados.

El archivo completo de simulación “Simulacion_XbeePro_2,4GHz.tcl” de NS-2 de la versión Xbee Pro 2,4GHz se encuentra en el **anexo III**.

3.4.2.2 Obtención de resultados

Para conseguir los resultados de la simulación se usa un filtro que es capaz de mostrar solo la información que se necesita del archivo de trazas o resultados que genera el simulador, en este caso información de paquetes enviados, paquetes recibidos, tasa de entrega de paquetes, throughput y el consumo energético de la red.

En la tabla III.XXII se muestra los datos obtenidos del tráfico de paquetes de la Red de Sensores Inalámbrica.

Tabla III.XXII. Datos tráfico de paquetes Xbee Pro 2,4Ghz

Nro. Nodo	Paquetes enviados	Paquetes Recibidos
0	828	27
1	816	826
2	817	835
3	797	828
4	77	837
5	419	804
6	933	1231
7	937	483
8	934	496
9	936	1248
10	926	473
TOTAL	8420	8088

Fuente: Los Autores

A continuación se muestra los resultados totales obtenidos sobre el tráfico y consumo energético de la simulación, véase tabla III.XXIII.

Tabla III.XXIII. Resultados simulación Xbee Pro 2,4GHz

<i>XBEE PRO 2,4 GHz</i>	
<i>Total Paquetes Enviados:</i>	8420
<i>Total Paquetes Recibidos:</i>	8088
<i>Tasa de Entrega de Paquetes (%):</i>	96
<i>Throughput (Kbps):</i>	4.0440
<i>Consumo Energético(Julios):</i>	46791.108815

Fuente: Los Autores

Para el resto de simulaciones en base a los valores obtenidos del análisis del modelo de propagación se realizó el mismo procedimiento con el cual se obtuvo un total de 10 simulaciones para esta versión. Los resultados obtenidos de cada simulación se pueden visualizar en el apartado 3.5.

3.4.3 Simulación de la Versión Xbee Pro 900 MHz

De igual manera que las simulaciones anteriores, en este caso se configurará los parámetros que caracterizan a esta versión, involucrando tanto a potencia recibida, sensibilidad del receptor dada por el datasheet del módulo Xbee 900 MHz y la frecuencia que es la principal particularidad de éste módulo.

3.4.3.1 Creación del escenario

En la tabla III.XXIV se muestra la conversión de potencias para la utilización dentro del archivo de simulación del NS-2.

Tabla III.XXIV. Conversión de Parámetros Xbee Pro 900 MHz

	<i>DBm</i>	<i>mW</i>
<i>Sensibilidad</i>	-100	$1 e^{-10}$
<i>Potencia Recibida</i>	-59,864	$1.03 e^{-6}$

Fuente: Los Autores

Con la medida de las variables dadas en mW se procede a configurar en el CSThresh la sensibilidad dada y en RXThresh la potencia recibida como se muestra.

```
Phy/wirelessPhy set CSThresh_ 1e-10
Phy/wirelessPhy set RXThresh_ 1.0318e-06
```

Seguidamente se realiza la configuración de la frecuencia de trabajo dada en Hz:

```
|Phy/wirelessPhy set freq_ 902e+06
```

Finalmente el consumo energético siendo uno de los factores primordiales de la transmisión de la señal se configura en el modelo de energía donde se establece la energía inicial del nodo, la potencia de transmisión en mW y el canal de transmisión.

```
-energyModel "EnergyModel"\  
-initialEnergy 5760 \  
-txPower 50 \  
-channel $chan_1_
```

Luego de haber realizado esta serie de configuraciones se debe ejecutar el archivo de simulación para la obtención de la simulación gráfica y el archivo de trazas donde se encuentran los resultados.

El archivo completo de simulación "Simulacion_XbeePro_900MHz.tcl" de NS-2 de la versión Xbee Pro 900 MHz se encuentra en el **anexo IV**.

3.4.3.2 Obtención de resultados

Para conseguir los resultados de la simulación se usa un filtro que es capaz de mostrar solo la información que se necesita del archivo de trazas o resultados que genera el simulador, en este caso información de paquetes enviados, paquetes recibidos, tasa de entrega de paquetes, throughput y el consumo energético de la red.

En la tabla III.XXV se muestra los datos obtenidos del tráfico de paquetes de la Red de Sensores Inalámbrica.

Tabla III.XXV. Datos tráfico de paquetes Xbee Pro 900MHz

Nro. Nodo	Paquetes enviados	Paquetes Recibidos
0	840	36
1	828	843
2	821	829
3	803	841
4	121	912
5	419	805
6	941	1237
7	937	485
8	931	494
9	1036	536
10	932	477
TOTAL	8609	7495

Fuente: Los Autores

A continuación se muestra los resultados totales obtenidos sobre el tráfico y consumo energético de la simulación, véase tabla III.XXVI.

Tabla III.XXVI. Resultados simulación Xbee Pro 900 MHz

XBEE PRO 900Mhz	
<i>Total Paquetes Enviados:</i>	8609
<i>Total Paquetes Recibidos:</i>	7495
<i>Tasa de Entrega de Paquetes (%):</i>	87
<i>Throughput (Kbps):</i>	3.7475
<i>Consumo Energético(Julios):</i>	46768.475710

Fuente: Los Autores

Para el resto de simulaciones en base a los valores obtenidos del análisis del modelo de propagación se realizó el mismo procedimiento con el cual se obtuvo un total de 10 simulaciones para esta versión. Los resultados obtenidos de cada simulación se pueden visualizar en el apartado 3.5.

3.5 Análisis de resultados

En el análisis de resultados, se realizará el estudio estadístico de los resultados obtenidos sobre el tráfico (tasa de entrega de paquetes y throughput de la red), consumo energético y cobertura de cada una de las simulaciones realizadas de cada versión Zigbee. En las tablas III.XXVII, III.XXVIII, III.XXIX y III.XXX se puede observar los resultados de las 10 simulaciones realizadas a cada versión de Zigbee mediante la generación de eventos aleatorios en cada simulación del escenario construido para las mediciones.

Tabla III.XXVII. Resultados de Tasa de entrega de paquetes

Variable:	Tasa de Entrega de Paquetes (%)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	90	96	87
2	90	96	87
3	92	97	88
4	91	96	86
5	89	95	84
6	90	97	86
7	89	96	84
8	89	97	87
9	90	96	86
10	91	97	85

Fuente: Los Autores

Tabla III.XXVIII. Resultados de throughput

Variable:	Throughput (Kb/s)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	3,8115	4,0440	3,7475
2	3,8235	4,3441	3,5678
3	3,8141	4,0562	3,9020
4	3,6525	4,2647	3,7776
5	3,7892	4,0543	3,2515
6	3,6632	4,0445	3,2534
7	3,8173	4,3241	3,7567
8	3,7534	4,8481	3,5860
9	3,7902	4,6078	3,6321
10	3,8224	4,0469	3,7473

Fuente: Los Autores

Tabla III.XXIX. Resultados de consumo energético

Variable:	Consumo Energético (Julios)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	46649,38287	46791,10882	46768,47571
2	46648,33277	46792,10341	46768,43437
3	46648,38283	46791,14455	46767,88965
4	46647,37638	46791,88745	46768,49132
5	46649,09523	46791,23412	46768,67278
6	46649,31569	46790,90885	46768,54378
7	46647,38731	46792,00082	46767,57581
8	46649,38287	46791,34765	46768,24671
9	46649,38437	46792,14322	46767,97531
10	46648,00234	46791,10882	46768,49138

Fuente: Los Autores

Tabla III.XXX. Resultados de Cobertura

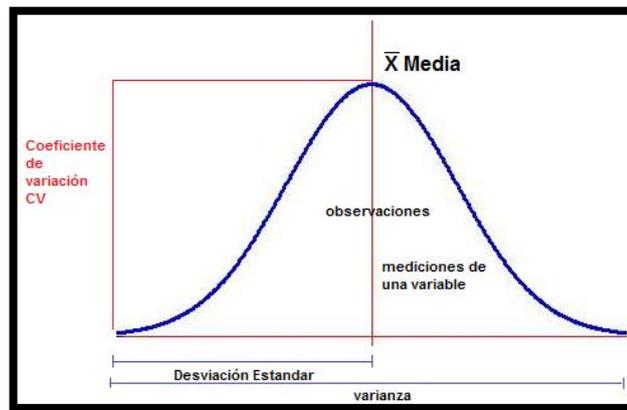
Variable:	Cobertura-Potencia Recibida (dBm)		
Observaciones	Xbee Serie 2	Xbee Pro 2,4GHz	Xbee Pro 900MHz
1	-80,651	-65,651	-57,217
2	-81,192	-66,192	-57,625
3	-81,689	-66,689	-58,002
4	-82,153	-67,153	-58,353
5	-82,59	-67,59	-58,684
6	-83,006	-68,006	-58,999
7	-83,402	-68,402	-59,299
8	-83,783	-68,783	-59,587
9	-84,152	-69,152	-59,864
10	-84,504	-69,504	-60,133

Fuente: Los Autores

Cada uno de los resultados de cada variable será analizado mediante el método estadístico de Tukey el cual es una distribución de probabilidad que nos permite estimar las diferencias significativas que existen entre las medias de una población de datos que se encuentran normalmente distribuidos, en los casos cuando el tamaño de las muestras u observaciones es pequeño. (3)

Al realizar la separación de medias por el método de Tukey se puede determinar las diferencias entre dos o más medias de un conjunto de muestras, en esta investigación se obtendrán la media, desviación estándar, varianza y coeficiente de variación de las mediciones de cada variable de cada modelo de estudio, en este caso los resultados obtenidos de cada versión Zigbee serán las observaciones que se tiene para realizar el análisis estadístico, véase figura III.XXXV, se tiene un total de 10 observaciones por cada variable.

Figura III.XXXV. Análisis estadístico de variables



Fuente: Los Autores

Posteriormente mediante el análisis de varianza ADEVA se realiza la comparación de las medias de cada variable para determinar el nivel de significancia y diferencia estadística que tiene cada media de cada variable de los 3 modelos en análisis.

Para este estudio el valor de significancia que se tiene en el análisis de varianza es de 0.05 para un 95% de precisión y exactitud en la medición de los datos y 5% de error entendiéndose como **significativo** y un valor de 0.01 para un 99% de precisión y exactitud en la medición de los datos y 1% de error entendiéndose como **altamente significativo**.

Cabe resaltar que las calificaciones dadas en forma de “a”, “b” y “c” hace referencia a “excelente”, “bueno” y “regular” respectivamente y “ab” una calificación compartida que se tratará como “muy bueno”.

A continuación se describe el estudio estadístico realizado para cada variable en análisis de este proyecto.

1. Variable de Tráfico: Entrega de paquetes

Tabla III.XXXI. Análisis estadístico, entrega de paquetes

Observaciones	Xbee Serie 2 (%)	Xbee Pro 2,4GHz (%)	Xbee Pro 900MHz (%)
1	90	96	87
2	90	96	87
3	92	97	88
4	91	96	86
5	89	95	84
6	90	97	86
7	89	96	84
8	89	97	87
9	90	96	86
10	91	97	85
n =	10	10	10
Sumatoria =	901	963	860
Media =	90.10	96.30	86.00
Desviación Estándar=	0.99	0.67	1.33
Media General=	90.80		
Significancia =	B	A	C

Fuente: Los Autores

Análisis de varianza para la entrega de paquetes:

Tabla III.XXXII. Análisis de varianza, entrega de paquetes

ADEVA						
FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA CUADRADOS	grados de libertad	CUADRADO MEDIO	FISHER		
				cal	0.05	0.01
TOTAL ENTRE MODELOS	566.80	29				
ERROR EXP.	537.8	2	268.90	250.36	3.35	5.49
	29.00	27	1.07			
CV=	1.14 %				*	**
				SIGNIFICANCIA =		

Significativo => *
Altamente Significativo => **

Fuente: Los Autores

Interpretación

Mediante el análisis de varianza se pudo determinar un valor de Fisher calculado de 250.36 el cual es mayor al valor de Fisher de significancia de 0.05 y 0.01, por lo cual se tiene una diferencia estadística altamente significativa de las medias de la variable de entrega de paquetes de cada versión de Zigbee, entendiéndose que el mejor modelo es la versión Xbee Pro 2.4GHz con una significancia de “a”, el segundo modelo es la versión Xbee Serie 2 con una significancia de “b” y el tercer modelo es la versión Xbee Pro 900MHz con una significancia de “c”.

2. Variable de Tráfico: Throughput

Tabla III.XXXIII. . Análisis estadístico, throughput

Observaciones	Xbee Serie 2 Kb/s	Xbee Pro 2,4GHz Kb/s	Xbee Pro 900MHz Kb/s
1	3.8115	4.0440	3.7475
2	3.8235	4.3441	3.5678
3	3.8141	4.0562	3.9020
4	3.6525	4.2647	3.7776
5	3.7892	4.0543	3.2515
6	3.6632	4.0445	3.2534
7	3.8173	4.3241	3.7567
8	3.7534	4.8481	3.5860
9	3.7902	4.6078	3.6321
10	3.8224	4.0469	3.7473
n =	10	10	10
Sumatoria =	37.73728	42.6347	36.2219
Media =	3.77	4.26	3.62
Desviación est=	0.06	0.28	0.22
Media General=	3.89		
Significancia =	ab	A	B

Fuente: Los Autores

Análisis de varianza para el throughput:

Tabla III.XXXIV. Análisis de varianza, throughput

ADEVA						
FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA CUADRADOS	grados de libertad	CUADRADO MEDIO	FISHER		
				cal	0.05	0.01
TOTAL	3.41	29				
ENTRE MODELOS	2.25	2	1.12	25.98	3.35	5.49
ERROR EXP.	1.17	27	0.04			
CV= 5.35 %				SIGNIFICANCIA =	*	**
				Significativo => *		
				Altamente Significativo => **		

Fuente: Los Autores

Interpretación

Mediante el análisis de varianza se pudo determinar un valor de Fisher calculado de 25.98 el cual es mayor al valor de Fisher de significancia de 0.05 y 0.01, por lo cual se tiene una diferencia estadística altamente significativa de las medias de la variable de throughput de cada versión de Zigbee, entendiéndose que el mejor modelo es la versión Xbee Pro 2.4GHz con una significancia de “a”, el segundo modelo es la versión Xbee Serie 2 con una significancia de “ab” y el tercer modelo es la versión Xbee Pro 900MHz con una significancia de “b”.

3. Variable Eficiencia Energética.

Tabla III.XXXV. Análisis estadístico, consumo energético

Observaciones	Xbee Serie 2 julios	Xbee Pro 2,4GHz julios	Xbee Pro 900MHz julios
1	46,649.38	46,791.11	46,768.48
2	46,648.33	46,792.10	46,768.43
3	46,648.38	46,791.14	46,767.89
4	46,647.38	46,791.89	46,768.49
5	46,649.10	46,791.23	46,768.67
6	46,649.32	46,790.91	46,768.54
7	46,647.39	46,792.00	46,767.58
8	46,649.38	46,791.35	46,768.25
9	46,649.38	46,792.14	46,767.98
10	46,648.00	46,791.11	46,768.49
n =	10	10	10
Sumatoria =	466,486.04	467,914.99	467,682.80
Media =	46,648.60	46,791.50	46,768.28
Desviación est= Media	0.82	0.48	0.35
General=	46,736.13		
Significancia =	a	C	B

Fuente: Los Autores

Análisis de varianza para el consumo energético:

Tabla III.XXXVI. Análisis de varianza, consumo energético

ADEVA						
FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA CUADRADOS	grados de libertad	CUADRADO MEDIO	FISHER		
				cal	0.05	0.01
TOTAL ENTRE MODELOS	117609.78	29				
ERROR EXP.	117600.57	2	58800.28	172,304.40	3.35	5.49
	9.21	27	0.34			
CV=	0.0012 %			SIGNIFICANCIA	*	**
				=		

Significativo => *
Altamente Significativo => **

Fuente: Los Autores

Interpretación

Mediante el análisis de varianza se pudo determinar un valor de Fisher calculado de 172304.40 el cual es mayor al valor de Fisher de significancia de 0.05 y 0.01, por lo cual se tiene una diferencia estadística altamente significativa de las medias de la variable de eficiencia energética de cada versión de Zigbee, entendiéndose que el mejor modelo es la versión Xbee Serie 2 con una significancia de “a”, el segundo modelo es la versión Xbee Pro 900MHz con una significancia de “b” y el tercer modelo es la versión Xbee Pro 2.4GHz con una significancia de “c”.

4. Variable Cobertura - Potencia Recibida

Tabla III.XXXVII. Análisis estadístico, cobertura

Observaciones	Xbee Serie 2 dBm	Xbee Pro 2,4GHz dBm	Xbee Pro 900MHz dBm
1	80,651	65,651	57,217
2	81,192	66,192	57,625
3	81,689	66,689	58,002
4	82,153	67,153	58,353
5	82,59	67,59	58,684
6	83,006	68,006	58,999
7	83,402	68,402	59,299
8	83,783	68,783	59,587
9	84,152	69,152	59,864
10	84,504	69,504	60,133
n =	10	10	10
Sumatoria =	827,12	677,12	587,76
Media =	82,71	67,71	58,78
Desviación est=	1,29	1,29	0,97
Media General=	69,73		
Significancia =	c	B	A

Fuente: Los Autores

Análisis de varianza para la cobertura según la potencia recibida:

Tabla III.XXXVIII. Análisis de varianza, cobertura

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA CUADRADOS	grados de libertad	CUADRADO MEDIO	FISHER		
				cal	0,05	0,01
TOTAL	2964,33	29				
ENTRE MODELOS	2925,93	2	1462,96	1.028,62	3,35	5,49
ERROR EXP.	38,40	27	1,42			
CV=		1,7102 %				* **
				SIGNIFICANCIA =		

Fuente: Los Autores

Interpretación

Mediante el análisis de varianza se pudo determinar un valor de Fisher calculado de 1028.62 el cual es mayor al valor de Fisher de significancia de 0.05 y 0.01, por lo cual se tiene una diferencia estadística altamente significativa de las medias de la variable de cobertura por potencia recibida de cada versión de Zigbee, entendiéndose que el mejor modelo es la versión Xbee Pro 900MHz con una significancia de “a”, el segundo modelo es la versión Xbee Pro 2.4GHz con una significancia de “b” y el tercer modelo es la versión Xbee Serie 2 con una significancia de “c”.

3.6 Comprobación de la hipótesis

De acuerdo a los resultados de las interpretaciones del estudio comparativo del apartado 3.5, para comprobar la hipótesis de esta investigación se utiliza la tabla III.31 para analizar los valores obtenidos de cada variable de estudio, en los cuales los mejores resultados se encuentran resaltados.

Tabla III.XXXIX. Resultados Totales

VARIABLE - PARÁMETRO	Unidad de medida	MODELO			MEDIA GENERAL	Desviación Estándar	Significancia	Coeficiente Variación
		Xbee Serie 2	Xbee Pro 2.4	Xbee Pro 900				
Entrega Paquetes	%	90.10 b	96.30 a	86.00 c	90.80	5.19	**	1.14
Throughput	Kb/s	3.77 ab	4.26 a	3.62 b	3.89	0.34	**	5.35
Consumo Energético	julios	46,649 a	46,791 c	46,768 b	46,736	76.68	**	0.0012
Cobertura	dBm	-82.712 c	-67.712 b	-58.776 a	-69.734	12.10	**	1.71

Fuente: Los Autores

Al considerar los valores obtenidos y sus mejores resultados de cada versión Zigbee, se pudo comprobar que la evaluación de la Red de Sensores Inalámbrica mediante los parámetros de tráfico (entrega de paquetes y throughput), eficiencia energética y cobertura de las diferentes versiones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, permitió determinar que la versión Zigbee Xbee Pro 2.4GHz es la más adecuada para la implementación de una Red de Sensores Inalámbrica para la detección de incendios forestales.

CAPITULO IV

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE LA RED INALÁMBRICA

4.1 Diseño de la Red de Sensores Inalámbrica

Después de haber realizado el estudio comparativo de las diferentes versiones Zigbee que utilizan el estándar IEEE 802.15.4 para la construcción de Redes de Sensores Inalámbricas y haber obtenido la mejor versión, en este caso la versión **Xbee Pro 2,4GHz**, para el diseño de la red se puede determinar que los parámetros de conectividad y cobertura de la WSN dentro de un Área Forestal dependen del rendimiento de este tipo de versión, la tabla IV.XL detalla la información de la versión Xbee Pro 2.4Ghz con sus diferentes modelos de producción, la cual fue tomada de su datasheet o ficha de datos mostrado en el **anexo VI**.

Tabla IV.XL. Modelos de versión Xbee Pro 2.4GHz

Xbee PRO	Max data rate	Frequency band	Transmit power	Antenna	IO pins digital	ADC inputs
XBee Pro 50mW (Mesh)	250kbps	2.4 GHz	50mW output (+17dBm).	RPSMA	8	(6) 10-bit
XBee Pro 50mW Serie 2.5	250kbps	2.4 GHz	50mW output (+17dBm).	Wire	8	(4) 10-bit
XBee Pro 60mW serie 1	250kbps	2.4 GHz	60mW output (+18dBm).	PCB	8	(6) 10-bit
XBee Pro 60mW	250kbps	2.4 GHz	60mW output (+18dBm)	Wire	8	(6) 10-bit

Fuente: XBee/XBee-PRO RF Modules, Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol

Para la implementación de la red se trabajará con el modelo: **Xbee Pro 60mW Wire Antenna** el cual trabaja a una frecuencia de 2.4 GHz y se muestra en la figura IV.XXXVI.

Figura IV.XXXVI. Xbee Pro 60mW Wire Antenna

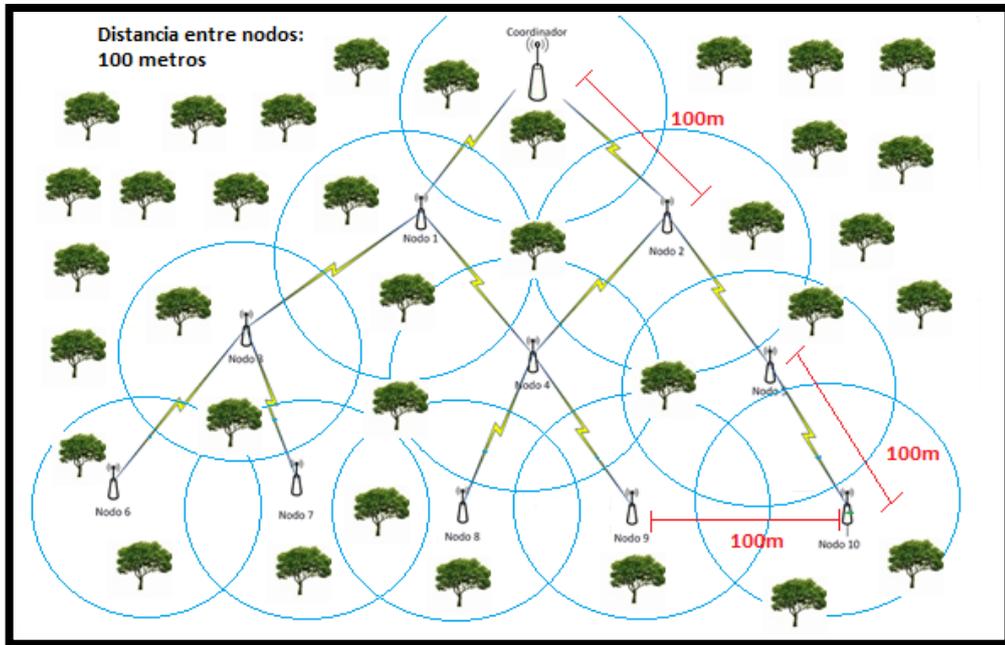


Fuente: www.digi.com

Mediante el análisis realizado en los apartado 3.2.1, se define que la distancia entre nodos es de 100 metros para garantizar que la conectividad se logre de manera eficiente y los niveles de interferencia no afecten de manera significativa a los enlaces de la WSN y se utiliza la topología de Árbol, ya que esta fue definida como la topología más óptima para este tipo de escenarios. En la figura IV.XXXVII se puede visualizar como se despliega el diseño de la

WSN dentro de un área forestal, tomando en cuenta el número de nodos establecido en las simulaciones computacionales.

Figura IV.XXXVII. Cobertura y topología nodos WSN



Fuente: Los Autores

4.2 Diseño de elementos de la red

Una vez definidos el tipo de topología y cobertura que tendrá la Red de Sensores Inalámbrica, se deben precisar los elementos que intervienen en el funcionamiento de la misma. Dentro de la arquitectura de una Red de Sensores Inalámbrica se realizará la descripción de los tres componentes que se considera principales dentro del diseño e implementación de la red.

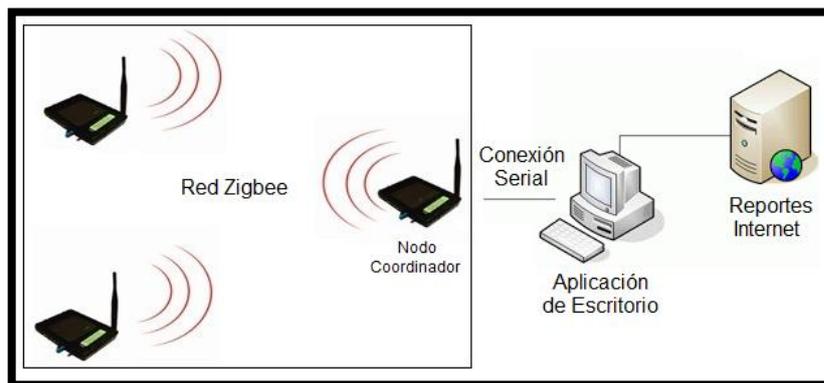
- Nodos Coordinadores.
- Nodos o Motas Sensoriales.
- Aplicación para manejo de datos.

Debido a que en una WSN el manejo de los datos que se transmiten dentro de la red solo se lleva a niveles de Capa 1 (Nivel Físico) y Capa 2 (Nivel de Enlace). Para complementar toda la operación que se realiza en la WSN, es necesario generar un mecanismo a nivel de aplicación para poder tener el

entendimiento de toda la información que entrega la Red de sensores Inalámbrica, es decir la WSN mediante sus nodos se encarga de la transmisión de los datos obtenidos por los sensores, pero esta información por sí sola no es entendible para un usuario, es así que es necesario generar una aplicación que se encargue de transformar todos estos datos recibidos en información que pueda ser mostrada mediante una interfaz hacia el usuario para su entendimiento.

De esta manera se muestra en la figura IV.XXXVIII todos los componentes de la red: Nodo Sensorial, Nodo Coordinador y Aplicación para manejo de datos, que operan conjuntamente realizando una actividad específica para que el funcionamiento de la WSN sea de manera eficiente.

Figura IV.XXXVIII. Componentes WSN

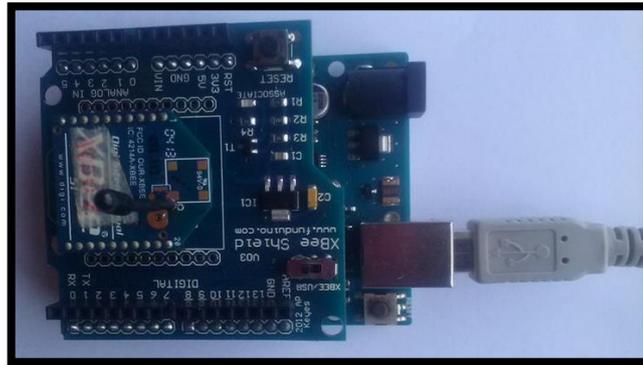


Fuente: Los Autores

4.3 Configuración del nodo coordinador

Para la creación de la base central que será la encargada de recolectar toda la información de los dispositivos que se encuentran captando los valores medioambientales en el área forestal se debe configurar el nodo coordinador el cual está conformado por un arduino sin el microcontrolador, un shield que servirá de interfaz entre el arduino y el módulo Xbee el cual se conectara directamente hacia un computador, como se visualiza en la figura IV.XXXIX:

Figura IV.XXXIX. Nodo Coordinador



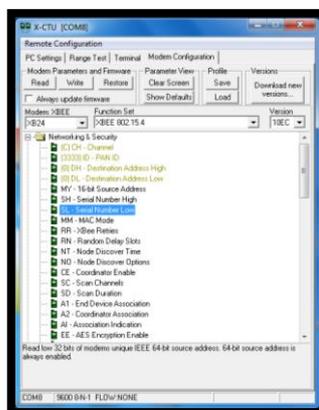
Fuente: Los Autores

El módulo Coordinador es el nodo más importante para la red, ya que en base a éste se formará la red, a éste se le otorgará una dirección PAN ID (identificador de red) y será el responsable de establecer el canal de comunicaciones; cuando éstos parámetros hayan sido dados, el nodo coordinador estará listo para añadir a la red routers o dispositivos finales, cabe además decir que el nodo coordinador actuará como un Router encaminando paquetes siendo origen y/o destino de información.

4.3.1 Configuración de módulo Xbee para nodo coordinador

Para la correcta configuración y posterior funcionamiento del módulo Xbee Coordinador, dentro de los parámetros que han sido modificados están el canal, el identificador de la red, la dirección de destino alta y la dirección de destino baja, como se visualiza en la figura IV.XL.

Figura IV.XL. Configuración Nodo Coordinador



Fuente: Los Autores

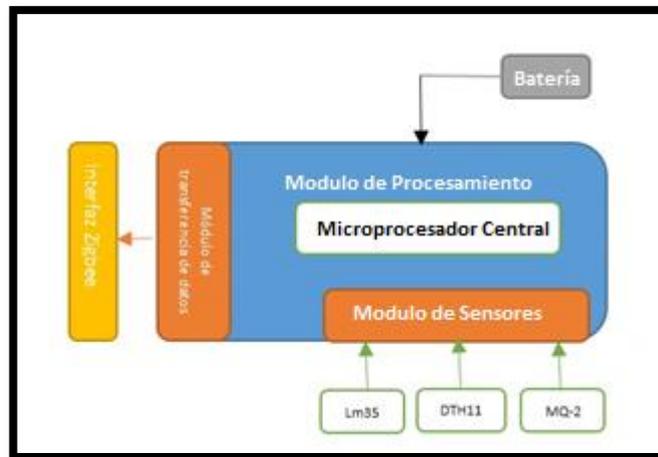
- Se ha elegido el Canal C por presentar menor interferencia en la comunicación, es así que se podría elegir entre 16 canales según el protocolo IEEE 802.15.4, esta norma indica que entre cada canal deben existir 5 MHz de diferencia partiendo de la frecuencia base 2,405 GHz se llega hasta los 2,480 Ghz (29), el módulo Xbee se encontrará en el canal 13 entre las frecuencias 2.4125 GHz y 2.4175 Ghz.
- La Pan ID o identificador de red se configurará con la PAN IP 3333.
- Dado que el nodo va a ser el coordinador y será el encargado de transmitir y recibir la data de todos los nodos que se encuentren en la red los parámetros de Destination Address High y Destination Address Low se configuró con el parametro 0.
- Los parámetros como el Serial Number High y el Serial Number Low no se los puede modificar debido a que estos son los identificadores de cada módulo Xbee.

4.4 Configuración de los Nodos Sensoriales (motas)

Para el diseño de un Nodo Sensorial se toma en cuenta principalmente la actividad que va a realizar este componente dentro de la Red de Sensores Inalámbrica, en este caso para el desarrollo de un Sistema de detección y prevención de incendios forestales, la actividad que debe realizar cada Nodo Sensorial es la recolección de información sobre los factores climáticos como son la temperatura y humedad del Área Forestal que se encuentre monitoreada, así como también cada nodo debe tener la capacidad de detectar los factores que se consideran evidencia para un posible incendio forestal como son los cambios bruscos de temperatura que puede producir un incendio o si existe la presencia de humo en el área monitoreada.

Para lograr estos dos objetivos tanto el monitoreo de los factores climáticos del Área Forestal como la detección de posibles incendios forestales cada nodo sensorial ha sido diseñado con tres módulos: Módulo de Sensores, Módulo de Procesamiento y Módulo de Transmisión inalámbrico que se visualizan en la figura IV.XLI.

Figura IV.XLI. Arquitectura del Dispositivo



Fuente: Los Autores

El **Modulo de Sensores** dentro del Nodo Sensorial está compuesto por un conjunto de sensores los cuales serán los encargados de recibir información del área forestal, monitoreando los factores climáticos como son: la temperatura, Humedad y si existe la presencia de humo, para de esta manera llevar un eficiente control de posibles incendios forestales que pueden desatarse dentro del área forestal. Los sensores utilizados para el diseño del Nodo sensorial son los siguientes:

- Sensor DTH-11: Este sensor es el encargado de obtener los valores de Humedad dentro del área monitoreada. Estos valores los entrega de manera digital.
- Sensor MQ-2: Este sensor es el encargado de obtener los valores de presencia de gases dentro del área monitoreada. Los gases que reconoce este sensor son: CO₂, LPG y partículas de humo, que son los gases que normalmente se producen producto de la combustión de un incendio.
- Sensor LM-35: Este sensor se utiliza a manera de respaldo para obtener los valores de temperatura del área monitoreada de forma analógica.

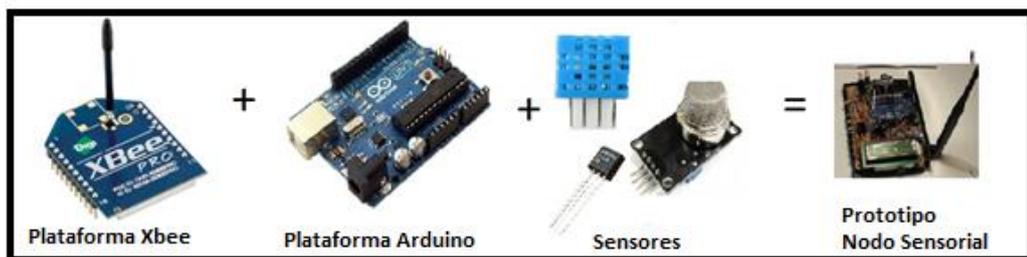
El **Módulo de Procesamiento** está diseñado con el uso de la plataforma de hardware libre Arduino, el cual se encarga de recibir los datos de cada sensor

ya sean de manera digital o analógica (Cada sensor se conecta hacia alguno de los puertos del microprocesador para el envío de sus valores). Después de recibir los valores de cada sensor el microprocesador se encarga de convertirlos a un solo formato para unirlos en una sola trama de información para posteriormente enviarlos mediante el siguiente módulo.

El **Módulo de Transmisión** haciendo uso de la interfaz inalámbrica de la plataforma Xbee, en este módulo se envía cada trama de información que el nodo requiere transmitir, toda la información antes recolectada será enviada hacia el nodo coordinador.

La unión de todos estos módulos nos permite a creación final de un nodo sensorial de la WSN como se visualiza en la figura IV.XLII.

Figura IV.XLII. Tecnologías y sensores utilizados en el desarrollo del Nodo Sensorial



Fuente: Los Autores

4.4.1 Configuración Módulo de Sensores

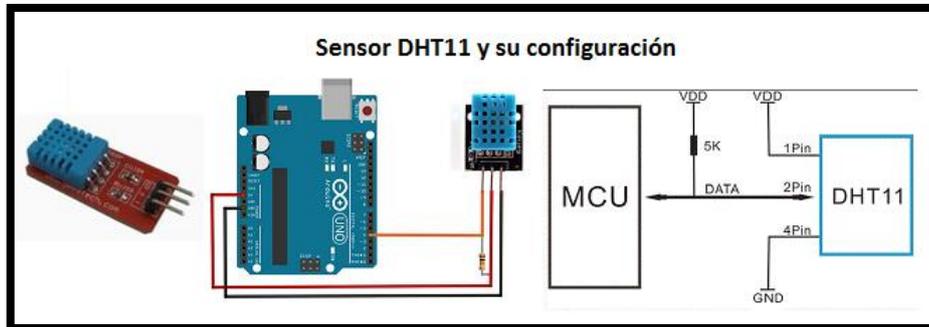
Se detalla a continuación los elementos necesarios para llevar a cabo una exitosa configuración del módulo sensorial:

Sensor DTH11

Es un sensor de humedad, muy útil debido a su baja complejidad, su bajo costo así como una precisión promedio; recalando que éste dispositivo nos proveerá de una salida digital por lo que nos da una de las ventajas frente a los sensores de tipo analógico que presentan fluctuaciones de voltaje que posibilitan errores en la lectura de los datos medioambientales, el dato obtenido es en porcentaje (%), se muestra el porcentaje de la humedad relativa que

existe, en la figura IV.XLIII se visualiza el sensor y como es su conexión con arduino.

Figura IV.XLIII. Sensor DHT-11



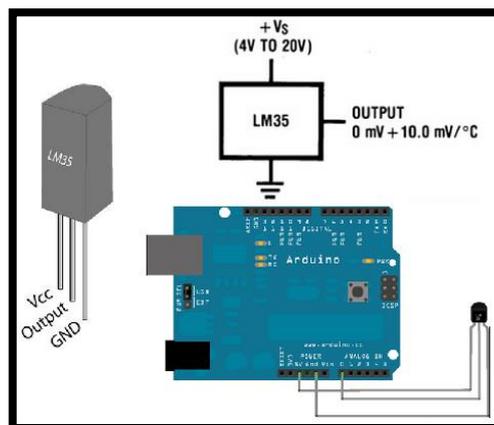
Fuente: Datasheet DHT11 - <http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf>

La descripción de la configuración para el funcionamiento del sensor con la plataforma arduino se describe en el apartado 4.4.2.

Sensor LM35

Elemento electrónico que mide temperatura de forma análoga, es un circuito de diodo Zener, el funcionamiento de este sensor es sencillo dado que el voltaje es directamente proporcional a la temperatura que detecta el sensor. El valor del nivel de voltaje obtenido por el sensor hace referencia un valor de temperatura específico dado en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$). El sensor y su acoplamiento con Arduino se muestran en la figura IV.XLIV.

Figura IV.XLIV. Sensor LM35



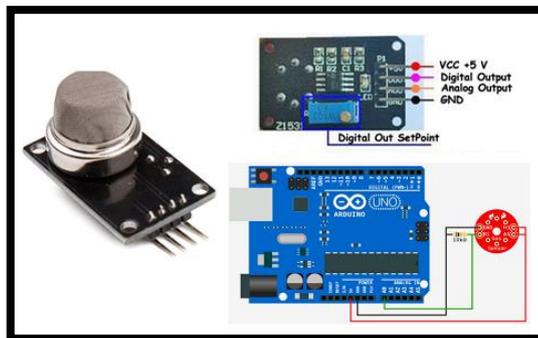
Fuente: <http://www.engineersgarage.com/electronic-components/lm35-sensor-datasheet>

La descripción de la configuración para el funcionamiento del sensor con la plataforma Arduino se describe en el apartado 4.4.2.

Sensor MQ2

Este sensor es el encargado de detectar la presencia de humo en el área forestal, parámetro que es imprescindible para la detección de un incendio forestal, ya que este dispositivo es muy sensible a partículas de humo, LPG, así como al Co₂. Este sensor es muy fácil de implementar debido a la sencillez de su arquitectura, a continuación se muestra en la figura IV.XLV la utilización de este sensor mediante la plataforma Arduino.

Figura IV.XLV. Sensor MQ-2



Fuente:http://cmostronics.in/product_info.php/smoke-methane-propane-hydrogen-butane-sensor-detector-mq2-p-314

En el funcionamiento de este sensor se hace hincapié en que su medición de presencia de gases se hace mediante la lectura de partículas del ambiente, el sensor es capaz de detectar desde 1ppm (partícula por millón) de gases de humo en el aire con lo cual se puede generar alertas de presencia de humo en el área, para esto se debe realizar una calibración del ambiente en el cual se encontrará el sensor.

La descripción de la configuración para el funcionamiento del sensor con la plataforma Arduino se describe en el apartado 4.4.2.

4.4.2 Configuración del Módulo de Procesamiento (Plataforma Arduino)

Para el diseño del módulo de procesamiento de nuestro Nodo Sensorial, se decidió utilizar la Plataforma de Hardware Libre Arduino. El Nodo o Mota Sensorial funcionará con el modelo más pequeño de la familia de placas de la plataforma Arduino, en este caso la placa Arduino UNO, la cual consta con las siguientes características que se muestran en la tabla IV.XLI (28):

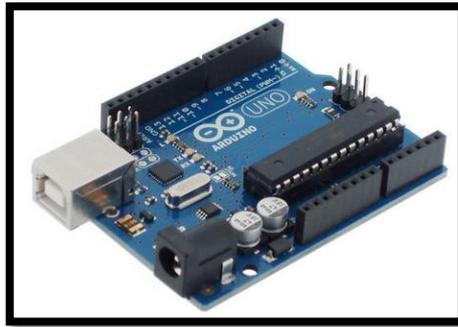
Tabla IV.XLI. Características Arduino UNO

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7 - 12V
Voltaje de entrada (limite)	6 - 20V
Pines para E/S Digital	14 (6 son PWM)
Pines para entrada analógica	6
Corriente continua por pin E/S	40 Ma
Corriente continua por pin 3.3V	50 Ma
Memoria Flash	32 KB (0.5 KB Ocupados)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

Fuente: www.arduino.cc

El hecho de que una de las prioridades en el funcionamiento del Nodo Sensorial debe ser la eficiencia energética en su funcionamiento, hace que se deba escoger una placa con un microcontrolador que no exija un nivel alto de consumo de energía, además que cada nodo sensorial solo necesita un requerimiento mínimo de pines del microcontrolador para la conexión de sus sensores, lo cual convierten al modelo Arduino UNO visualizado en la figura IV.XLVI (28), como la mejor opción a comparación de otras placas de la misma plataforma para este tipo de diseño e implementación.

Figura IV.XLVI. Arduino UNO



Fuente: www.arduino.cc

Cada nodo o mota de la Red de Sensores Inalámbrica como se mencionó anteriormente está compuesto por un módulo de sensores los cuales operan en base a la configuración que se ha realizado en el módulo de procesamiento del nodo que se encuentra contenido dentro de la plataforma Arduino. Toda la programación que es insertada en el módulo de procesamiento del nodo permite el funcionamiento de cada proceso que realiza el nodo dentro de la red sensorial, desde la adquisición de datos por parte de los sensores hasta la parte de transmisión de la información procesada mediante la interfaz inalámbrica Xbee.

A continuación se detalla cada parte de la programación realizada para ser grabada en el microprocesador de la plataforma Arduino que va a formar parte de cada nodo o mota sensorial. Este código es desarrollado mediante el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino:

Descripción del código empleado en Arduino para cada nodo o mota Sensorial

Como primera parte tenemos la definición de las librerías que necesita la placa Arduino para funcionar con los Sensores de MQ-2 y DHT 11, y que parámetros necesita cada sensor, además de las variables globales del programa:

```
////////*****PROGRAMA PARA NODO SENSORIAL DE LA RED WSN*****////////
```

```
#include <LiquidCrystal.h>
#define DHT11_PIN 4 // pin del sensor humedad
```

Definir las Variables del Sensor de Humo MQ-2:

```
#define MQ_PIN (0) //define el pin para el sensor de humo
#define RL_VALUE (5) // define la resistencia de carga del sensor, en kilo
ohmios
#define RO_CLEAN_AIR_FACTOR (9.83) // define factor de aire limpio, de la ficha
técnica
```

Definir los Parámetros de la Calibración del Sensor MQ-2:

```
#define CALIBARAION_SAMPLE_TIMES (50) // definir cuántas muestras se van a
tomar en la fase de calibración

#define CALIBRATION_SAMPLE_INTERVAL (500) // definir el intervalo de tiempo (en
milisegundos) entre cada uno de las muestras en la fase calibración

#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50) // definir cuántas muestras se van a
tomar en el funcionamiento normal
#define READ_SAMPLE_TIMES (5) // definir el intervalo de tiempo (en
milisegundos) entre cada muestra en operación normal
```

Definir las Variables de medición de Macros Sensor MQ-2:

```
#define GAS_LPG (0)
#define GAS_CO (1)
#define GAS_SMOKE (2)
```

Definir las Variables Globales del sensor de humo MQ-2, para los gases LPG,
CO2 y Humo:

```
float LPGCurve(3) = {2.3,0.21,-0.47
float COCurve(3) = {2.3,0.72,-0.34};
float SmokeCurve(3)={2.3,0.53,-0.44};
float Ro = 10; //Variable de Resistencia Ro inicia en 10 kilo
ohms
```

Definir las Variables para el uso del LCD del Nodo:

```
int i = 25;
LiquidCrystal lcd(12,11,5,4,3,2); //pines para el lcd
```

Definir las Variables para Sensor de Temperatura LM-35:

```
float val2 = 0;
float temp2 = 0;
```

```
int analogPin1 = 5; //pin para los sensores de temperatura

int led_power = 8; //variables para los leds indicadores
int led_piloto = 13;
```

Proceso de Calibración y Activación del Sensor Digital DHT-11:

```
byte read_dht11_dat()
{
  byte i = 0;
  byte result=0;
  for(i=0; i< 8; i++)
  {
    while(!(PINC & _BV(DHT11_PIN)));
    delayMicroseconds(30);

    if(PINC & _BV(DHT11_PIN))
      result |= (1<<(7-i));
    while((PINC & _BV(DHT11_PIN)));
  }
  return result;
}
```

Después de haber declarado las librerías, variables globales y parámetros de cada sensor. La siguiente parte del código del Sketch es la función Setup:

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //establecer la velocidad de la conexión serial en baudios

  Ro = MQCalibration(MQ_PIN); //Calibración del Sensor de humo MQ-2 de acuerdo al
  ambiente en que se encuentre, poner en aire limpio

  DDRC |= _BV(DHT11_PIN); //Inicialización de los pines del Sensor DHT-11
  PORTC |= _BV(DHT11_PIN);

  pinMode (led_piloto, OUTPUT); //modo de los pines digitales para salida de LEDs

  pinMode (led_power, OUTPUT);
}
```

En la tercera parte del código de programación del Sketch se define la función Loop, que es el código que se ejecutara repetidamente mientras el dispositivo se encuentre encendido:

```
void loop()
{
```

Programación del Sensor Digital de Humedad DHT-11 para el cálculo de los valores de humedad y temperatura del área monitoreada:

```
byte dht11_dat(5);
byte dht11_in;
byte i;

PORTC &= ~_BV(DHT11_PIN);
delay(18);
PORTC |= _BV(DHT11_PIN);
delayMicroseconds(40);

DDRC &= ~_BV(DHT11_PIN);
delayMicroseconds(40);

dht11_in = PINC & _BV(DHT11_PIN);

if(dht11_in)           // Condición para la detección de fallos en la lectura del sensor
{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" ERROR SISTEMA ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" FALLA SENSOR ");
  Serial.println("/3/Error Sensor de Humedad");
  return;
}
delayMicroseconds(80);

dht11_in = PINC & _BV(DHT11_PIN);

if(!dht11_in)        // Condición para la detección de fallos en la lectura del sensor
{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" ERROR SISTEMA ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" FALLA SENSOR ");
  Serial.println("/3/Error Sensor de Humedad");
  return;
}

delayMicroseconds(80);
for (i=0; i<5; i++)
  dht11_dat(i) = read_dht11_dat();

DDRC |= _BV(DHT11_PIN); //Lectura de datos del Sensor
PORTC |= _BV(DHT11_PIN); //Lectura de datos del Sensor

byte dht11_check_sum = dht11_dat(0)+dht11_dat(1)+dht11_dat(2)+dht11_dat(3);
if(dht11_dat(4)!= dht11_check_sum)
```

Programación del Sensor Digital MQ-2 para el cálculo de los valores de Gases LPG, CO2 o si existe presencia de humo dentro del área monitoreada:

// Cálculo del parámetro de Resistencia del Sensor mediante la lectura del voltaje y la resistencia del sensor

```
float MQResistanceCalculation(int raw_adc)
{
  return ( ((float)RL_VALUE*(1023-raw_adc)/raw_adc));
}
```

```
}
```

// Cálculo del parámetro de Calibración del sensor, como entrada se tiene la lectura del sensor y como salida Ro (Resistencia Inicial, asume que el aire está limpio).

```
float MQCalibration(int mq_pin)
{
    int i;
    float val=0;

    for (i=0;i<CALIBARAION_SAMPLE_TIMES;i++) { //toma varias muestras
        val += MQResistanceCalculation(analogRead(mq_pin));
        delay(CALIBRATION_SAMPLE_INTERVAL);
    }
    val = val/CALIBARAION_SAMPLE_TIMES; //Se calcula el valor medio del
    ambiente

    val = val/RO_CLEAN_AIR_FACTOR;

    return val;
}
```

// Se realiza la lectura de los valores que entrega el sensor para cada tipo de gas en el ambiente, este valor se obtiene en ppm (Partículas por Millón)

```
float MQRead(int mq_pin)
{
    int i;
    float rs=0;

    for (i=0;i<READ_SAMPLE_TIMES;i++) {
        rs += MQResistanceCalculation(analogRead(mq_pin));
        delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
    }

    rs = rs/READ_SAMPLE_TIMES;

    return rs;
}
```

```
int MQGetGasPercentage(float rs_ro_ratio, int gas_id)
{
    if ( gas_id == GAS_LPG ) {
        return MQGetPercentage(rs_ro_ratio,LPGCurve);
    } else if ( gas_id == GAS_CO ) {
        return MQGetPercentage(rs_ro_ratio,COCurve);
    } else if ( gas_id == GAS_SMOKE ) {
        return MQGetPercentage(rs_ro_ratio,SmokeCurve);
    }

    return 0;
}
```

```
int MQGetPercentage(float rs_ro_ratio, float *pcurve)
{
    return (pow(10,((log(rs_ro_ratio)-pcurve(1))/pcurve(2)) + pcurve(0))));
}
```

Cálculo de los valores de los sensores analógicos LM-35 y LDR:

```
val2 = analogRead(analogPin1); //Lectura Sensor de temperatura LM-35

temp2 = (5.0 * val2*100.0)/1023.0; //Cálculo del valor analógico del sensor
val2 = temp2;

valorLDR = analogRead(pinLDR); // Lectura Sensor de Luz LDR

luz = ((valorLDR*100.0)/1023.0); //Cálculo del valor analógico del sensor
```

Finalmente se realiza el envío de toda la información recolectada por cada sensor del nodo, este envío se lo realiza mediante la interfaz inalámbrica Xbee, por lo cual en el código se realiza una impresión en el puerto serial, el cual es adoptado por el módulo Xbee para el envío de manera inalámbrica:

```
Serial.print("/1/"); //el numero hace referencia al número de nodo en este caso: nodo 1
Serial.print("LPG:"); //se envía el valor sobre el Gas LPG
Serial.print(MQGetGasPercentage(MQRead(MQ_PIN)/Ro,GAS_LPG) );
Serial.print( "ppm" );
Serial.print("/");
Serial.print("CO:"); //se envía el valor sobre el Gas CO2
Serial.print(MQGetGasPercentage(MQRead(MQ_PIN)/Ro,GAS_CO) );
Serial.print( "ppm" );
Serial.print("/");
Serial.print("SMOKE:"); //se envía el valor sobre la presencia de humo
Serial.print(MQGetGasPercentage(MQRead(MQ_PIN)/Ro,GAS_SMOKE) );
Serial.print( "ppm" );
Serial.print("/");
Serial.print(val2); //se envía el valor sobre la temperatura del sensor analógico
Serial.print("/");
Serial.print(dht11_dat(0), DEC); //se envía el valor sobre la temperatura Sensor DHT-11
Serial.print("/");
Serial.print(dht11_dat(2), DEC); //se envía el valor sobre la humedad Sensor DHT-11
Serial.print("/");
Serial.print(luz); //se envía el valor sobre el porcentaje de luz del Sensor LDR
Serial.println();

//Encendido y apagado de LED PILOTO
digitalWrite(led_piloto, HIGH);
delay(500);
digitalWrite(led_piloto, LOW);
delay(500);

//Valor a mostrar en LCD del Nodo Sensorial.
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("CONTROL FORESTAL");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(" SISTEMA: NODO 1");

} // Fin de la función loop

//////////////////*****FIN DEL PROGRAMA *****///////////////////
```

Mediante el código de programación explicado previamente un Nodo de la Red de Sensores Inalámbrica es capaz mediante su módulo de Procesamiento de recibir todos los datos que los sensores entregan, y poder unirlos en una sola trama de información final la cual es entregada hacia el módulo de Transmisión para su envío por la red de manera inalámbrica.

4.4.3 Configuración de Módulo de Transmisión Plataforma Xbee.

Para una configuración exitosa del módulo emisor de datos hacia la base central se necesita establecer algunos parámetros en éste; para ello utilizaremos una multiplataforma desarrollado por Digi llamado X-CTU, aplicación que se puede utilizar tanto en Windows como en MacOS, plataforma que nos permitirá configurar los parámetros deseados en el módulo.

Para realizar la configuración se necesita que el modulo X-bee esté conectado al Arduino mediante un Shield, éste a su vez realizará la conexión por medio del puerto serial, se debe tomar en cuenta que el shield deberá estar en modo USB como se visualiza en la figura IV.XLVII para realizar los siguientes procesos.

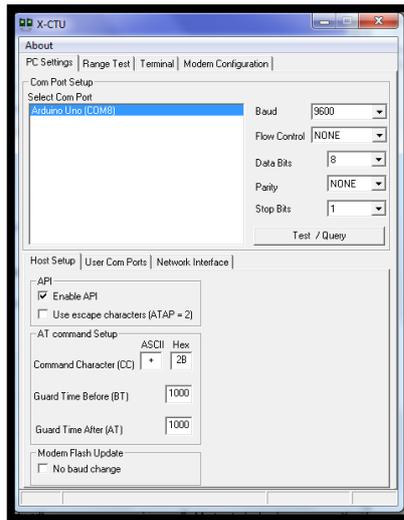
Figura IV.XLVII. Shield Xbee



Fuente:<http://www.oddwires.com/xbee-series-1-802-15-4-series-2-zigbee-mesh-pro-shield-for-arduino/>

Al conectarse hacia un computador se ejecutará la multiplataforma X-CTU, aquí se establece las variables para la conexión con el módulo como se visualiza en la figura IV.XLVIII.

Figura IV.XLVIII. Ventana Inicial de X-CTU

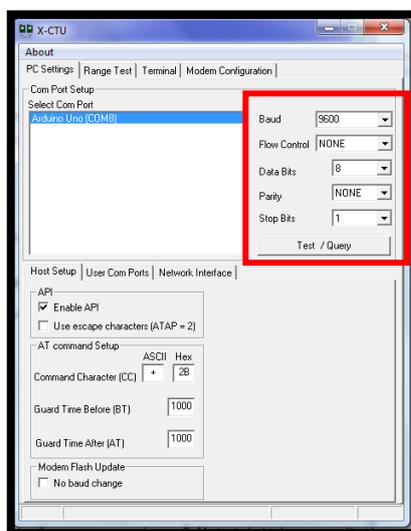


Fuente: Los Autores

Para realizar la configuración se accede mediante el Com Port Setup, y se escoge el puerto COM en el que se está leyendo la información del módulo a configurar, en este caso el Puerto COM 8.

En la figura IV.XLIX, se puede ver los parámetros que se especifica como son los baudios a los que trabajará el computador con la plataforma, los bits de datos, así como la paridad y los bits de parada, para posteriormente establecer la conexión.

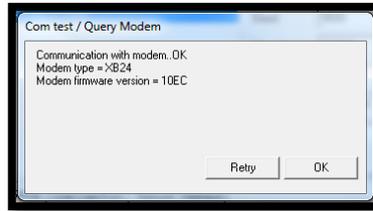
Figura IV.XLIX. Configuración del Puerto Com.



Fuente: Los Autores

Después de establecer la conexión, aparecerá un mensaje que se visualiza en la figura IV.L que informa que el software está listo para empezar a realizar la configuración del módulo Xbee.

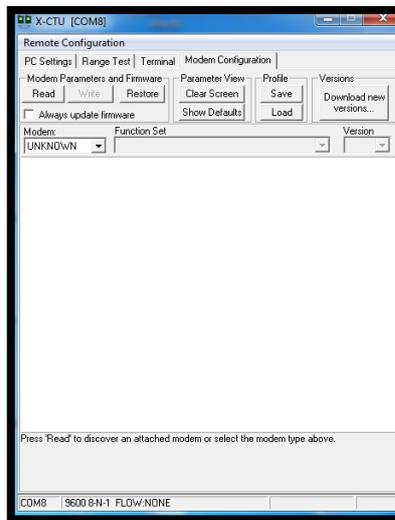
Figura IV.L. Conexión Exitosa con el Modulo Xbee



Fuente: Los Autores

Para realizar una configuración con mucha facilidad, se utiliza el modo de "Modem Configuration", modo que permite interactuar con la interfaz de una manera mucho más sencilla mediante opciones gráficas, en la figura IV.LI se visualiza la interfaz de configuración del módulo.

Figura IV.LI. Modem Configuration

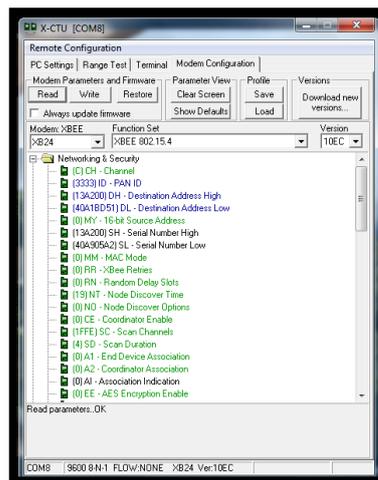


Fuente: Los Autores

En la interfaz mencionada anteriormente se pueden realizar las configuraciones del módulo Xbee, para que este funcione como un nodo sensorial inalámbrico dentro de la WSN. Las configuraciones realizadas son las siguientes:

- El canal que se configuró es el canal C, dado que se necesita que tanto el nodo coordinador como los dispositivos sensoriales se encuentren en el mismo canal.
- El identificador de red al igual que el canal se requiere que sea el mismo que el nodo coordinador en el caso el ID 3333.
- Las variables que se diferencian de la configuración del nodo coordinador son la Dirección de destino Alta que se configurará con el Serial Number High del Nodo coordinador y en la Dirección de destino Baja, aquí se agregará el Serial Number Low del nodo principal. Todas estas configuraciones se pueden visualizar en la figura IV.LII.

Figura IV.LII. Configuración módulo Xbee como nodo final



Fuente: Los Autores

Una vez realizadas la configuración en cada uno de los módulos que forman parte del nodo sensorial, se debe acoplarlos para su funcionamiento unificado. En la figura IV.LIII se observa el nodo sensorial construido en este proyecto con todos sus componentes ensamblados en un solo dispositivo el cual es alimentado con una batería de 9 VCC.

Figura IV.LIII. Dispositivo Nodo Sensorial Inalámbrico



Fuente: Los Autores

4.5 Aplicación para Manejo de datos

Toda la información emitida por cada nodo o mota sensorial es recibida por un nodo Coordinador el cual se debe conectar hacia un sistema que sea dedicado para usuarios finales en donde se puede visualizar toda la información receptada por los nodos coordinadores de la Red de Sensores Inalámbrica, esta comunicación entre el nodo coordinador y el sistema es de manera serial, la comunicación se realiza con el establecimiento de un puerto COM en el ordenador del Sistema para la transmisión serial de la información como se visualiza en la figura IV.LIV. Todos los datos son recibidos de manera conjunta y son procesados para su entendimiento por el sistema, el cual está compuesto por dos partes: una Aplicación de Escritorio y un Servidor Web.

Figura IV.LIV. Conexión Nodo Coordinador y Computador



Fuente: Los Autores

La **Aplicación de Escritorio** se encarga de recibir todos los datos de la WSN en tiempo real con intervalos de tiempo determinados, para su procesamiento y visualización, para de esta manera tener un monitoreo en tiempo real del área forestal que la red sensorial está cubriendo y en el caso de que se presente alguna emergencia referente a un problema ambiental la aplicación sea capaz de generar las respectivas alarmas para la prevención y el tratamiento de la emergencia del área forestal. Además la aplicación es capaz de realizar la generación de reportes en archivos de texto sobre las condiciones ambientales que se encuentran monitoreando cada nodo o mota sensorial dentro de la red, para que todos estos reportes sean almacenados en un Servidor Web.

El **Servidor Web** se encarga de almacenar todos los reportes de archivos de texto que la aplicación de escritorio genere sobre la Red de Sensores Inalámbrica, y que estos reportes sean visualizados mediante una página web para cualquier usuario que acceda a la misma, es así que el servidor web debe estar conectado hacia internet para que la visualización de los reportes de la WSN estén disponibles en cualquier lugar.

4.5.1 Aplicación de Escritorio

Esta aplicación está construida mediante Visual Estudio con lenguaje de programación Visual Basic el cual está dirigido por eventos basado en .NET Framework. La aplicación de escritorio se encuentra estructurada en tres

interfaces gráficas para el manejo de los eventos que ocurren dentro de la Red Sensorial Inalámbrica, las cuales se encargan de informar al usuario las actividades de monitoreo del estado climático del área forestal y la prevención de un incendio forestal en la misma. Las tres interfaces que se manejan en la aplicación de escritorio son las siguientes:

- **Interfaz Principal o de Monitoreo:** Esta interfaz es la encargada del monitoreo del área forestal, es decir que en esta interfaz se visualiza toda la información que es emitida por cada nodo o mota sensorial dentro de la red inalámbrica, todos los datos acerca de las variables ambientales que recoge cada sensor de la red más información extra como es el estado de funcionamiento, estado de la batería y ubicación de cada nodo son mostrados en la interfaz principal en tiempo real.
- **Interfaz de Ubicación (Mapas Virtuales):** En esta interfaz mediante el uso de las coordenadas geográficas (latitud y longitud) que envía cada nodo sensorial hacia la aplicación, se puede representar la ubicación geográfica de cada nodo sensorial de la WSN mediante la utilización de mapas virtuales dentro de la aplicación, esto se lo realiza con la ayuda de la herramienta google-maps, la cual se encarga de generar el mapa virtual dentro de la aplicación para mostrar de manera precisa la ubicación de un nodo, en el caso de suceder una emergencia dentro del área forestal, esta herramienta es muy útil para ayudar a ubicar de manera más rápida y eficiente los puntos del área forestal afectados que un nodo de la Red Sensorial Inalámbrica ha detectado.
- **Interfaz de Alertas:** En esta interfaz se manejan todas las alertas sobre la detección de posibles incendios forestales que llegan hacia la aplicación, es decir cuando cualquiera de los nodos detecta un cambio brusco de temperatura o la presencia de humo en el área monitoreada, esta información es enviada hacia la aplicación de escritorio la cual mediante el uso de su interfaz gráfica de Alertas genera la alerta en tiempo real sobre el nodo que genero la alerta y el lugar en donde este se encuentra.

La descripción de funcionamiento y manual del manejo de esta aplicación de escritorio se encuentra ubicado en el **anexo I**, en el cual se describe detalladamente cada interfaz y su operación.

4.6 Pruebas de funcionamiento de la WSN

Para la realización de las pruebas de funcionamiento de la WSN en un área forestal se pudo tener acceso a los bosques que se encuentran dentro de la hacienda “*Monte Mirador*” ubicada en el sector de Santa Lucia de Tembo, Parroquia de San Isidro del cantón de Guano de la provincia de Chimborazo, en la figura IV.LV se puede visualizar su ubicación mediante una gráfica satelital de los bosques en los cuales se pudo realizar las respectivas pruebas.

Figura IV.LV. Ubicación Áreas Forestales para pruebas de funcionamiento WSN



Fuente: Google Earth

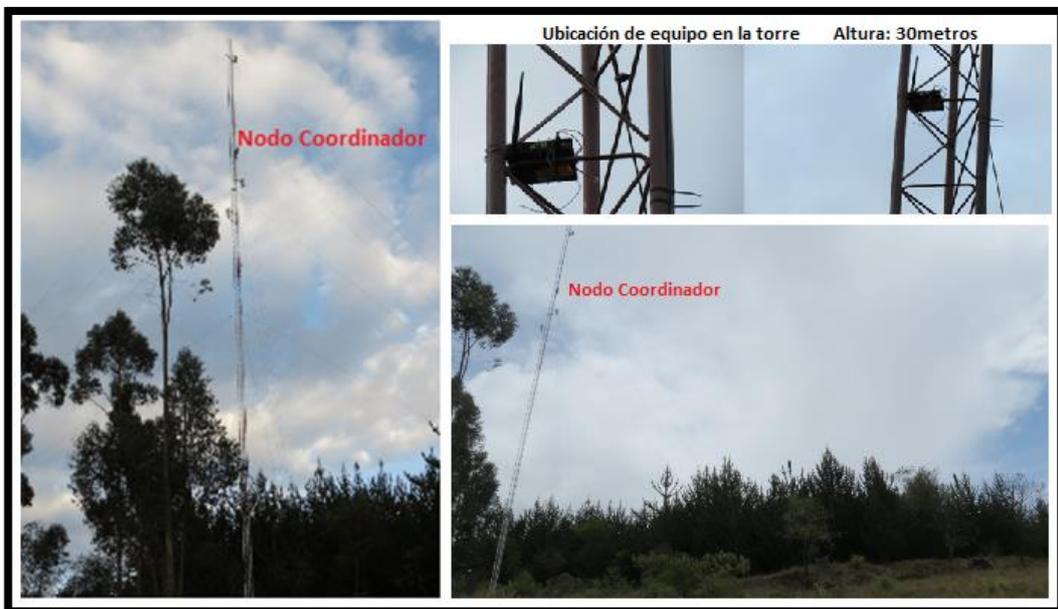
Esta área tiene una superficie total de 17,67 hectáreas (ha) la cual cuenta con tres tipos de escenarios forestales para la realización de las pruebas:

- Dos escenarios forestales de diferente especie; el primero es un bosque conformado por arboles de pino y el segundo es un bosque con árboles de eucalipto.
- El tercer escenario está compuesto por superficies con poca vegetación sin la presencia abundante de árboles.

Para la realización de las pruebas de comunicación de la WSN dentro de estos tres tipos de escenarios se realizó la ubicación del nodo coordinador en un punto medio del área como se visualiza en la figura IV.LV, para de esta manera poder realizar las mediciones en cualquiera de los tres escenarios propuestos.

Según el análisis de propagación realizado en el apartado 3.2, la altura a la cual se ubica el nodo coordinador es de 30 metros, es de esta manera que para la realización de estas pruebas se decide ubicar el nodo coordinador a la misma altura propuesta en el análisis de propagación, en la figura IV.LVI se puede visualizar la ubicación del nodo coordinador en la altura especificada.

Figura IV.LVI. Ubicación del nodo coordinador en el área forestal



Fuente: Los Autores

La ubicación del nodo sensorial receptor se encontrará dentro de cada escenario forestal según la distancia a la que se vaya realizando cada una de las mediciones, en la figura IV.LVII se puede visualizar la colocación del nodo

sensorial en una determinada posición del área forestal para la realización de las mediciones de potencia recibida en el enlace inalámbrico entre el nodo coordinador y el nodo sensorial. La altura a la cual se ubica el nodo sensorial es de 3 metros, basado en el análisis de propagación realizado en el apartado 3.2.

Figura IV.LVII. Ubicación del nodo sensorial en el área forestal



Fuente: Los Autores

4.6.1 Descripción de los escenarios de prueba

Cada escenario en el que se realizaron las pruebas tiene sus propias características que intervienen en las mediciones del funcionamiento de la WSN, a continuación se describe cada área forestal en la cual se realizaron las pruebas:

Bosque de pino: Esta área forestal se caracteriza por su gran densidad de árboles con gran cantidad de ramas, aunque las hojas que posee cada rama son de un tamaño pequeño, el tamaño de los árboles tiene un promedio de 10 metros de altura y 0,20 metros de ancho. En la figura IV.LVIII se puede observar el bosque de pino.

Figura IV.LVIII. Escenario forestal, árboles de pino



Fuente: Los Autores

La distancia que existe entre cada árbol plantado es de 3 metros, ya que es un bosque sembrado mediante una planificación previa por lo cual esta distancia que existe entre los árboles se encuentra bien establecida, es así que por ejemplo en una área de 10 m^2 se puede tener un total de 9 árboles de pino, en la figura IV.LIX se puede observar la distribución de los árboles en esta área forestal.

Figura IV.LIX. Distribución árboles de pino



Fuente: Los Autores

Bosque de eucalipto: Dentro del área también se encontró un escenario forestal compuesto por arboles de la especie de eucalipto, en este caso el bosque está compuesto de una distribución de árboles de manera aleatoria, el cual se caracteriza por su gran densidad de árboles con gran cantidad de

ramas y hojas de un tamaño mediano, el tamaño de los arboles tiene un promedio de 8 metros de altura y 0,20 metros de ancho, no existe una distancia definida entre cada árbol. En la figura IV.LX se puede observar el bosque de eucalipto en el cual se realizó las pruebas.

Figura IV.LX. Escenario forestal, árboles de eucalipto



Fuente: Los Autores

Área con poca vegetación: Finalmente se tiene un escenario forestal el cual se caracteriza principalmente por su baja cantidad de árboles y presencia de abundante vegetación de tamaño pequeño, en este caso la presencia de pocos arboles de manera aleatoria dentro del área permite tener un escenario más abierto y con la presencia de pocas interferencias en cuanto a la línea de vista entre el nodo coordinador y el nodo receptor. En la figura IV.LXI se puede observar el área con la presencia de poca vegetación.

Figura IV.LXI. Escenario forestal, área con poca vegetación



Fuente: Los Autores

4.6.2 Pruebas de cobertura y potencia recibida

Una vez ubicados tanto el nodo coordinador como el nodo sensorial y escogido el escenario de pruebas, para la realización de las mediciones de cobertura de la WSN y de potencia recibida del enlace se utilizó un analizador de espectro, véase figura IV.LXII, con el cual se pudo obtener las medidas de la señal recibida en dBm que se tenía del enlace inalámbrico a determinadas distancias en cada uno de los escenarios ambientales. Los parámetros configurados en el analizador de espectro para las pruebas de la WSN son los siguientes:

Frecuencia inicial: 2 GHz

Frecuencia Final: 2,5 GHz

Frecuencia central: 2,239 GHz

Frecuencia de operación de la señal en medición: 2457 MHz (canal 11)

Rango de Potencia recibida en analizador: -20 dBm inicial, -110 dBm final.

Intervalos: 10 dBm

Los valores de las mediciones obtenidos con el uso de esta herramienta se detallan en las tablas IV.XLII y IV.XLIII, mediante estos valores se pudo determinar el alcance máximo de cobertura que tiene la WSN en cada uno de los escenarios planteados en el apartado 4.6.1. Se realizó un total de cuatro pruebas por cada escenario y cada medición se realizó en intervalos de distancia de 20 metros

Tabla IV.XLII. Medidas Potencia Recibida en escenarios forestales

		Potencia Recibida (dBm)					
		Zona de poca vegetación		Bosque de Pino		Bosque de Eucalipto	
		Primera Prueba	Segunda Prueba	Primera Prueba	Segunda Prueba	Primera Prueba	Segunda Prueba
Distancia (metros)	20	-34	-33	-39	-39	-39	-38
	40	-34,5	-34	-46	-45	-44	-44
	60	-36	-34,5	-52	-51	-48	-49,5
	80	-37	-35	-57	-56	-54	-55
	100	-38,5	-38	-64	-64	-59,5	-60
	120	-40	-39	-71	-70	-69	-69
	140	-41	-39,5	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	160	-41,5	-40	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	180	-42	-40,5	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	200	-43	-42	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	220	-45	-45	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	240	-47	-49	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	260	-49	-55	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	280	-54	-61	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	300	-62	-65	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	320	-68	-70	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
320	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite	

Fuente: Los Autores

Tabla IV.XLIII. Medidas Potencia Recibida en escenarios forestales 2

		Potencia Recibida (dBm)					
		Zona de poca vegetación		Bosque de Pino		Bosque de Eucalipto	
		Tercera Prueba	Cuarta Prueba	Tercera Prueba	Cuarta Prueba	Tercera Prueba	Cuarta Prueba
Distancia (metros)	20	-33	-33,5	-38	-40	-39,5	-40
	40	-34	-35	-44	-47	-44	-46
	60	-34,5	-35,5	-51,5	-54	-48	-50
	80	-35	-37	-55	-56,6	-55	-56,5
	100	-38	-38	-63,5	-64	-60,5	-62
	120	-39	-39	-69	-70	-71	-70
	140	-39,5	-39,5	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	160	-40	-40	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	180	-40,5	-40,5	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	200	-42	-41,5	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	220	-45	-42,5	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	240	-49	-46	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	260	-55	-53	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	280	-61	-59	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
	300	-65	-64	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite
320	-70	-68	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite	
320	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite	no transmite	

Fuente: Los Autores

Figura IV.LXII. Analizador de Espectro



Fuente: Los Autores

Las gráficas de las mediciones de la señal obtenidas por el analizador de espectro en cada punto de medición se encuentran para su visualización en el **anexo V**.

4.6.3 Pruebas de consumo energético

Para la medición de consumo energético que tuvieron los nodos de la red, se utilizó para su operación baterías Li-Po de 2 celdas, véase figura IV.LXIII, las cuales proporcionan un voltaje continuo de 8 Voltios en su carga inicial y su principal característica es el bajo nivel de descarga que se tiene en su uso.

Figura IV.LXIII. Batería Lipo de 8VCC



Fuente: Los Autores

Para realizar la medición de la energía acumulada en cada batería se utiliza la unidad de medida de energía que es el Julio (J), el cual se obtiene en base a los valores de carga y descarga que tiene la batería dado en amperios por hora (Ah) y el voltaje inicial que tiene la batería dado en voltios (V), esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$Descarga_{Bateria}[Ah] * Voltaje[V] * 3600 = Energia (J)$$

Para obtener la medida de consumo de energía que tuvo cada nodo durante el desarrollo de las pruebas de la WSN, se obtuvo el valor de carga inicial de cada batería y el valor de carga al apagar cada nodo después de realizar las pruebas. El tiempo total que se tuvo encendido y en operación cada nodo fue de 8 horas.

Los parámetros que presenta cada batería en el valor de descarga es de 150 mAh (0,150 Ah), y un voltaje inicial de 8,2 VCC, en la tabla IV.XLIV se pueden visualizar los resultados obtenidos de la medición de consumo energético que tuvo el nodo coordinador y el nodo sensorial durante su operación.

Tabla IV.XLIV. Medidas de consumo energético en nodos

	Nodo Coordinador		Nodo Sensorial	
	Voltaje (V)	Energía (J)	Voltaje (V)	Energía (J)
Valores Iniciales	8,2	4428	8,2	4428
Valores después de 8 horas de operación	7,84	4233,6	7,6	4104
TOTAL DE ENEGIA CONSUMIDA		194,4		324

Fuente: Los Autores

CONCLUSIONES

- Al evaluar las diferentes versiones de Zigbee, mediante análisis de propagación y con el uso del software simulador NS-2 se pudo determinar que la versión Xbee Pro 2.4GHz es la mejor versión para la implementación de una WSN para áreas forestales la cual cuenta con una tasa de entrega de paquetes del 96,30%, un throughput de red de 4,26 Kbps, un parámetro de recepción promedio en su cobertura de -67.712 dBm y un eficiente consumo energético similar al resto de versiones en análisis.
- Existen varios modelos de propagación que permiten modelar en cierta forma el escenario de un área forestal, aunque se vuelve una tarea muy complicada debido a la gran variedad de obstáculos y las irregularidades que existen en los mismos, el poder tener una aproximación exacta de las pérdidas que puede tener un enlace debido a los troncos, ramas, hojas y vegetación pequeña que existe en un área forestal es muy complicado. En este estudio mediante el modelo de Weissberger se pudo obtener una aproximación de las pérdidas en el cálculo teórico muy cercana a los valores obtenidos en las pruebas prácticas realizadas.
- La información sobre las características de operación del módulo Xbee Pro 2.4GHz indican una sensibilidad de recepción del módulo de -100 dBm, en la práctica según las pruebas realizadas de potencia recibida se pudo determinar que la transmisión inalámbrica entre dos módulos Xbee de estas características se logra eficientemente hasta un valor de sensibilidad de -70 dBm.
- La implementación de las Redes Sensoriales Inalámbricas bajo el estándar 802.15.4 ha permitido generar soluciones en diversas áreas en donde dispositivos sensoriales con un mínimo consumo de recursos y energía pueden actuar como agentes de obtención de datos importantes para su análisis, es así que en el área de protección ambiental, hoy en día las redes de sensores son un aporte significativo

para generar sistemas de prevención, monitoreo y detección de posibles desastres ambientales.

- El estándar 802.15.4 fue diseñado específicamente para cubrir necesidades de transmisión de datos de un conjunto de dispositivos que cumplen una función específica dentro de la red con una tasa de transmisión de información definida y no para dar un servicio a usuarios dentro de la red, lo cual hace que no se tengan parámetros de calidad de servicio o una alta capacidad del canal.
- Se implementó un sistema que permite utilizar la tecnología actual para dar solución a un problema ambiental, social y económico; mejorando la capacidad de actuación ante un incendio forestal haciendo que los organismos encargados del control cuenten con un mecanismo de actuación preventiva y fiable; maximizando la protección de las áreas forestales.

RECOMENDACIONES

- El simulador NS-2 es capaz de generar un gran número de resultados, se recomienda realizar códigos de programación en lenguaje AWK que permitan crear mejores filtros que sean capaces de obtener solo los resultados de interés para el usuario del archivo de trazas de NS-2.
- Para alargar más el tiempo de operación de la batería de un nodo, se recomienda investigar sobre mejores plataformas o mecanismos de procesamiento para optimizar de mejor manera el consumo de energía ya que la plataforma Arduino consume mayor energía a comparación del módulo Xbee.
- Se recomienda que para una correcta operación de los módulos Xbee se realice una actualización del firmware para evitar problemas posteriores en la configuración y aprovechar al máximo las funcionalidades que ofrecen estos dispositivos.
- Se recomienda la investigación sobre la creación de nuevos mecanismos que permitan la comunicación de las WSN con otros tipos de red como son las TCP/IP así como aplicaciones que puedan tener un mejor manejo y tratamiento de la información que puede entregar una WSN.
- Para la implementación de la WSN, se recomienda verificar la frecuencia a utilizar y si esta se encuentra permitida para su operación dentro del espectro radioeléctrico de la región de aplicación.

BIBLIOGRAFIA

- (1) **LEE, W.**, Wireless and Cellular Telecommunications., 3ra ed., Washington-EEUU., Ed. McGraw Hill., 1998., Pp. 349-369.
- (2) **MENG, S., LEE, W.**, Study of Propagation Loss Prediction in Forest Environment., 1ra ed., Ciudad de Singapore-Singapore., 2009., Pp. 122-124.
- (3) **ROMERO, R., ZÚNICA, L.**, Métodos Estadísticos en Ingeniería., 1ra ed., Valencia-España., Ed. Univ. Politéc. Valencia., 2005., Pp. 155-158.
- (4) **AKYILDIZ, I., VURAN, M.**, Wireless Sensor Networks (Advanced Texts in Communications and Networking)., 1a ed., New Jersey-EEUU., Ed. Mankrono Print Media., 2010., Pp. 417-440.
- (5) **NAVARRO, S.**, Algoritmos Cross-Layer para la Optimización de las Prestaciones del Tcp en Redes Wireless Ad-Hoc., 1ra ed., Sevilla-España., Ed. Univ. Politéc. Valencia., 2005., Pp. 5-10.
- (6) **MONTOYA, A., OVALLE, D.**, Evaluación del Desempeño en Redes Inalámbricas de Sensores Mejoradas con Agentes Móviles., 1ra ed., Bogotá-Colombia., Ed. Revista EIA., 2012., Pp. 151-166.
- (7) **WIGHTMAN, R., LABRADOR, M.**, ¿Reducir el Rango de Comunicación o apagar nodos?: una evaluación inicial de estrategias para control de topología en redes inalámbricas de sensores., 1ra ed., Bogotá-Colombia., s.e., 2010., Pp. 66-88.
- (8) **SWARUP, S., TEWARI, R.**, Propagation Characteristics of VHF/UHF Signals in Tropical Moist Deciduous Forest., 1ra ed., Washington-EEUU., Ed. Institution of Electronics and Telecommunication Engineers., 1975., Pp. 123–125.
- (9) **TAMIR, T.**, On Radio-Wave Propagation in Forest Environments., 1ra ed., Washington-EEUU., s.e., 1967., Pp. 806–817.

(10) **WEISSBERGER, M.**, An Initial Critical Summary of Models for Predicting the Attenuation of Radio Waves by Foliage., 1ra ed., Annapolis-EEUU., s.e., 1981., Pp. 10-20.

(11) **COMITÉ CONSULTIVO INTERNACIONAL DE RADIOCOMUNICACIONES, SUIZA.**, Influences of Terrain Irregularities and Vegetation on Troposphere Propagation., 1ra ed., Ginebra-Suiza., Ed. CCIR., 1986., Pp. 235-236.

(12) **EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY, LUXEMBURGO.**, Radio Propagation Effects on Next-generation Fixed-service Terrestrial Telecommunication Systems., 1ra ed., Luxemburg- Luxemburg., Ed. COST., 1996., Pp. 10-20.

(13) **NAVARRO, J.**, Simulación de Redes de Sensores Wireless. 1ra ed., Barcelona-España., s.e., 2010., Pp. 10-14.

(14) **PARK, S.**, SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks. 1ra ed., Los Ángeles-EEUU., Ed. UCLA Compilers Group., 2004., Pp. 1-7.

(15) **SAIGUA, S., VILLAFUERTE, M.**, Evaluación de las Topologías Físicas de WSN mediante la Implementación de un Prototipo de Medición de Variables Ambientales para el G.E.A.A.- ESPOCH. Tesis Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes., Riobamba-Ecuador., 2014., Pp. 118.

(17) **INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, EEUU.**, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 802.15.4a-2003., 1ra ed., New York – EEUU., Ed. IEEE., 2003., Pp. 18.

(18) **INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, EEUU.**, WPAN Low Rate Alternative PHY Task Group 4^a, 802.15., 1ra ed., New York – EEUU., Ed. IEEE TG4a., 2003., Pp. 17.

(19) **SUÁREZ, J., LLANO, G.**, Revisión del Estado del Arte de IR-Ultra-Wideband y Simulación de la Respuesta Impulsiva del Canal IEEE 802.15.4a., 1ra ed., Bogotá-Colombia., s.e., 2010., Pp. 105-127.

(20) **INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, EEUU.**, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY), Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 802.15.4a-2006., 2da ed., New York – EEUU., Ed. IEEE., 2006., Pp. 5-19.

(21) **ESCOBAR, M.**, Wireless Sensors Network: estado del arte e investigación., 1ra ed., Madrid-España., s.e., 2003., Pp. 4.

(22) **MURA, M.**, Modelización del Costo de la Energía de la Seguridad en Redes Inalámbricas de Sensores: el caso de 802.15.4., 1ra ed., San Petesburgo-Rusia., s.e., s.f., Pp. 3.

(23) **DIGI INTERNATIONAL, EEUU.**, Xbee Series 2 OEM RF Modules, Product Manual v1.x.1x - ZigBee Protocol., 1ra ed., Minnesota-EEUU., Ed. Digi., 2007., Pp. 4-6.

(24) **DIGI INTERNATIONAL, EEUU.**, XBee/XBee-PRO RF Modules, Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol., 1ra ed., Minnesota-EEUU., Ed. Digi., 2009., Pp. 4-6.

(25) **DIGI INTERNATIONAL, EEUU.**, XBee-PRO 900/DigiMesh 900 OEM RF Modules Product Manual., 1ra ed., Minnesota-EEUU., Ed. Digi., 2008., Pp. 4-6.

BIBLIOGRAFÍA DE INTERNET

(26) Ministerio del Ambiente., Día Mundial De La Eficiencia Energética., [Web en línea]., <<http://www.ambiente.gob.ec/5-de-marzo-dia-mundial-de-la-eficiencia-energetica/>>., [Consulta 2014-09-06].

(27) Diario La Hora., Agua Ayuda A Controlar Incendios., [Web en línea]., <<http://www.lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101397929#.U4JzdPI5OSo>>., [Consulta 2014-10-24].

(28) Arduino., Arduino., [Web en línea]., <<http://www.arduino.cc>>., [Consulta 2014-09-09].

(29) MCI Electronics., Guia De Usuario, Xbee Series., [Web en línea]., <www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf>., [Consulta 2014-11-15].

(30) UPB., Universidad Pontificia Bolivariana., [Web en línea]., <http://www.upb.edu.co/portal/page?_pageid=1054,35125578&_dad=portal&_schema=PORTAL>., [Consulta 2015-01-15].

(31) OMNET., What Is Omnet++?., [Web en línea]., <<http://www.omnetpp.org/home/what-is-omnet>>., [Consulta 2015-01-06].

(32) ZIGBEE ALLIANCE., Tecnologia Zigbee., [Web en línea]., <<http://www.zigbee.org/>>., [Consulta 2015-01-10].

RESUMEN

La investigación consistió en la evaluación de una Red de Sensores Inalámbrica (WSN) basada en el estándar IEEE 802.15.4 para sistemas de detección de incendios forestales en bosques de la Provincia de Chimborazo.

La investigación se efectuó mediante el método no experimental, basado en la medición sobre las variables específicas de desempeño en la red tales como: tasa de entrega de paquetes, tasa de transferencia, consumo energético y cobertura bajo parámetros que describen un entorno forestal.

Mediante el apoyo del software Simulator NS-2 así como el Modelo de Weissberger se evaluó las variables antes mencionadas y con los resultados obtenidos se definió la mejor versión de una Red de Sensores Inalámbrica, posteriormente se implementó el prototipo de la red para medir variables ambientales dentro de un área forestal, usando un computador como gestor de datos además de las Plataformas Arduino y Xbee.

Como resultado de la evaluación de las versiones, Xbee Series 2, Xbee Pro 2,4GHz y Xbee Pro de 900MHz de una (WSN), se obtuvo que la versión Xbee Pro 2,4GHz posee las mejores métricas con una tasa de entrega de paquetes del 96,30%, tasa de transferencia de 4,26 Kbps, consumo de energía y área de cobertura aceptables a comparación del resto de versiones que fueron evaluadas.

Se concluye que la versión Xbee Pro 2.4GHz es la más adecuada para la implementación de un sistema de monitoreo, prevención y detección de incendios forestales para bosques de pino y eucalipto de la Provincia de Chimborazo.

Se recomienda que esta investigación sea empleada por entidades encargadas de la preservación del Ambiente, como el Ministerio de Ambiente o Cuerpo de Bomberos.

Palabras Clave:<Red de Sensores Inalámbrica> <Bosque> <Nodos>
<Cobertura> <Tráfico> <Consumo energético> <Xbee> <IEEE 802.15.4>.

ABSTRACT

The research involved the evaluation of a Wireless Sensor Network (WSN) based on the IEEE 802.15.4 standard for detection systems wildfires in forest of the province of Chimborazo.

The investigation was conducted by the non-experimental method based on the measurement of the specific variables of network performance such as packet delivery rate, transfer rate, low energy consumption and coverage parameters describing a forest environment.

By supporting software Simulator NS-2 and the Weissberger model, the above variables was evaluated and the results obtained were defined the best version of a Wireless Sensor Network, then the prototype network was implemented to measure environmental variables within a forest area, using a computer as a data manager in addition to the Arduino and Xbee platforms.

As a result of evaluation versions, Xbee Series 2 Xbee Pro XBee Pro 2.4GHz and 900MHz of one (WSN), it was found that Xbee Pro 2.4GHz version has the best metric with a delivery rate of packets of 96.30%, transfer rate of 4.26 Kbps, power consumption and area acceptable to compare the other versions that were evaluated coverage.

We conclude that Xbee Pro 2.4GHz version is most suitable for the implementation of a system for monitoring, prevention and detection of forest fires for pine and eucalyptus forests in the province of Chimborazo.

It is recommended that this research be used by agencies responsible for environmental preservation, as the Ministry of Environment or the Fire Department.

Keywords: <Wireless Sensor Network> <Forest> <Node> <Coverage> <Traffic> <Energy consumption> <Xbee> <IEEE 802.15.4>.

ANEXOS

Anexo I

Manual descriptivo de la Aplicación de Escritorio para el Sistema de Monitoreo y Prevención de Incendios Forestales.

En el presente manual se describe el funcionamiento de cada una de las interfaces que posee la aplicación de escritorio creada para el manejo de la información proporcionada por la WSN para Sistemas de monitoreo y prevención de incendios forestales.

Interfaz Principal o de Monitoreo

La aplicación de escritorio está compuesta por un conjunto de interfaces gráficas que dan diferentes niveles de información acerca de la red. La primera interfaz gráfica de la Aplicación de Escritorio está diseñada por dos módulos, el primer módulo es el de recepción de datos de los nodos sensoriales de la red para la visualización de los valores de temperatura, humedad, cantidad de luz y si existe o no presencia de humo que son enviados por cada nodo sensorial en un intervalo de tiempo definido, y el segundo módulo es el de comunicación con la red en el cual se lleva un control sobre la transmisión de la información que llega a la aplicación y el estado de funcionamiento en el que se encuentra cada nodo. Finalmente en esta interfaz, la aplicación posee un conjunto de acciones como la sincronización de la información recibida hacia un servidor web, también se puede determinar, habilitar o deshabilitar la conexión con la red, y finalmente la opción de acceder hacia otra interfaz gráfica en la cual mediante mapas virtuales se puede obtener la ubicación de algún nodo en específico, véase figura I.

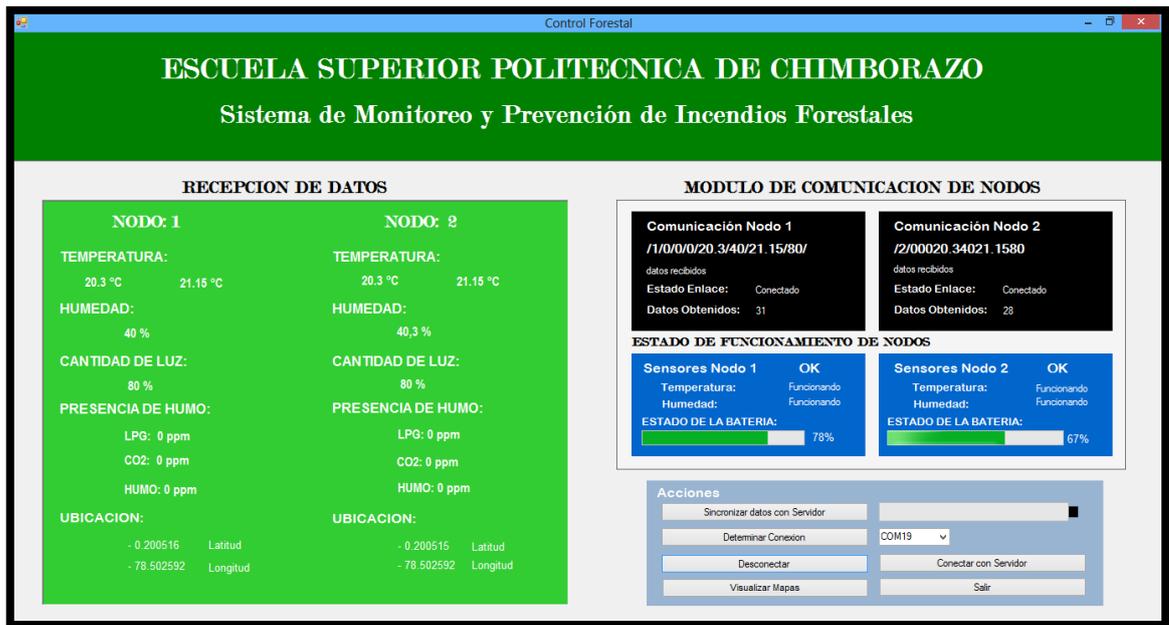


Figura I. Interfaz Gráfica, Aplicación de Escritorio

Fuente: Los Autores

Módulo de Recepción de Datos

En el módulo de recepción de datos se especifica que nodos están conectados a la red y se muestra en tiempo real los valores de las variables que están transmitiendo, en este caso cada nodo sensorial transmite la información acerca de la temperatura, humedad, cantidad de luz, si existe la presencia de humo mediante la entrega de valores de gases como son LPG y CO_2 , además muestra la ubicación en la que se encuentra el nodo sensorial mediante la visualización de sus coordenadas tanto de latitud como de longitud, véase figura II.

RECEPCION DE DATOS			
NODO: 1		NODO: 2	
TEMPERATURA:		TEMPERATURA:	
20.3 °C	21.15 °C	20.3 °C	21.15 °C
HUMEDAD:		HUMEDAD:	
40 %		40,3 %	
CANTIDAD DE LUZ:		CANTIDAD DE LUZ:	
80 %		80 %	
PRESENCIA DE HUMO:		PRESENCIA DE HUMO:	
LPG: 0 ppm		LPG: 0 ppm	
CO2: 0 ppm		CO2: 0 ppm	
HUMO: 0 ppm		HUMO: 0 ppm	
UBICACION:		UBICACION:	
- 0.200516	Latitud	- 0.200515	Latitud
- 78.502592	Longitud	- 78.502592	Longitud

Figura II. Recepción de Datos

Fuente: Los Autores

Como se puede visualizar en la figura II, cada nodo tiene su visualización de los valores que envía hacia la aplicación, así tenemos que:

En el recuadro de Temperatura se visualizan dos valores, el primero es el valor entregado por el sensor digital de temperatura DHT11, y el segundo valor es entregado por el sensor analógico de temperatura LM35, los dos sensores envían valores que son interpretados en grados centígrados (°C), estos valores nos sirven para verificar el estado de temperatura actual del área forestal y además nos sirven como referencia para generar posibles alertas dentro de la aplicación en el caso de generars ibios bruscos de temperatura o la presencia de valores altos de temperatura.

En el recuadro de Humedad y cantidad de Luz, se visualizan tanto el valor que es entregado por el sensor digital DHT11 sobre la humedad del ambiente como el valor obtenido por el Sensor de Luz del Nodo, en este caso la humedad relativa y la cantidad de luz son representados en forma de porcentaje (%), con

respecto al ambiente, y este valor nos sirve como referencia para ver el estado de humedad y la cantidad de luz que hay en un área forestal.

En el recuadro de Presencia de Humo, se visualizan los valores obtenidos del sensor de gas MQ-2 del Nodo sensorial, el cual entrega valores de presencia de gases en el ambiente como son el LPG (Gas Licuado del Petróleo) y el CO_2 los cuales son medidos en ppm (Partículas por Millón), en el caso de existir la presencia de partículas de este tipo de gases en el ambiente la aplicación es capaz de generar la alerta ante un posible incendio forestal debido a la presencia de partículas de humo en el ambiente monitoreado. Hay que tomar en cuenta que los valores que se dan sobre si existe la presencia de humo en el ambiente son los más importantes al momento de generar las alertas en la aplicación.

Finalmente en el recuadro de Ubicación, la aplicación visualiza el valor recibido del nodo sensorial sobre su ubicación mediante coordenadas geográficas que indican el valor en decimal de la Latitud y Longitud, estos valores son insertados en cada nodo sensorial dependiendo del punto exacto en el cual se ha ubicado el nodo y mediante su comunicación por la red inalámbrica hasta llegar hacia la aplicación el nodo es capaz de informar su ubicación. Esta información es muy importante ya que nos sirve para que en la aplicación mediante mapas virtuales se pueda visualizar la ubicación de cada nodo.

Módulo de Comunicación de los Nodos

En este módulo de la aplicación de escritorio se visualiza todo sobre el proceso de transmisión de la información de la red hacia la aplicación, es decir se visualiza las tramas de información que llegan en cada intervalo de tiempo, si los datos fueron recibidos correctamente, el número de datos obtenidos y el estado de conexión de cada nodo.

La aplicación también visualiza como se encuentra el estado de funcionamiento de cada nodo, es decir comprueba que los sensores de cada nodo se encuentren funcionando correctamente y lleva también un control sobre el estado de la batería de alimentación del mismo, véase figura III.

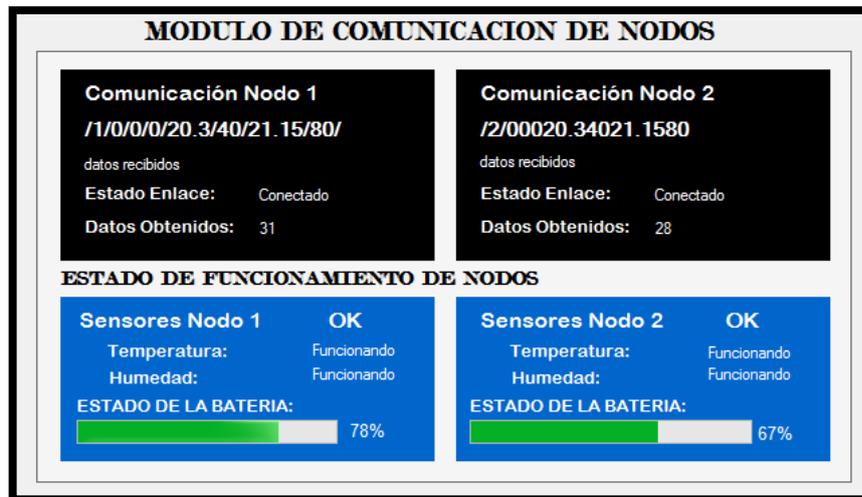


Figura III. Recepción de Datos

Fuente: Los Autores

Cada nodo envía una trama de información en un intervalo de tiempo determinado, es así que el módulo de comunicación de nodos para cada nodo que transmite dentro de la red se encuentra en 3 estados. El primer estado es cuando recibe una trama de información de un nodo específico, véase figura IV.a, y es visualizado en el recuadro de información de la interfaz la trama que ingreso del nodo, el estado de conexión y cuantos datos fueron recibidos. El segundo estado es cuando el módulo de comunicación de nodos se encuentra en estado de espera, es decir cuando ningún nodo se encuentra transmitiendo y en la interfaz de la aplicación no se encuentra ningún dato de entrada, véase figura IV.b. Finalmente el tercer estado es cuando el módulo de comunicación de nodos se encuentra en estado inactivo o desconectado de la red, es decir no existe la entrada de ningún dato hacia la aplicación debido a que no existe conexión con la red de sensores inalámbrica, véase figura IV.c.

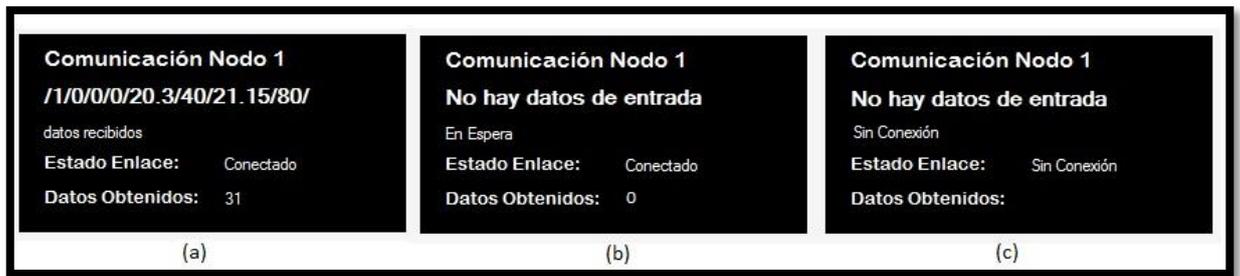


Figura IV. Módulo Comunicación de Nodos

Fuente: Los Autores

En el recuadro de la interfaz gráfica de la aplicación de escritorio acerca del estado de Funcionamiento de los Sensores se encuentra registrada la información que cada nodo sensorial envía en su trama sobre cómo se encuentra el estado de cada sensor que contiene el nodo sensorial, en este caso los tres sensores que se manejan en cada nodo son los sensores: LM35, DHT11 y MQ-2. Estos tres sensores se pueden encontrar en dos estados de funcionamiento, estado “Funcionando” y estado “Falla en Sensor”, cualquiera de estos dos estados son enviados desde el nodo en su trama de información hacia la aplicación de escritorio para que esta sea la encargada de mostrar en qué estado se encuentra cada sensor. El primero estado: “Funcionando”, es cuando cada sensor se encuentra funcionando correctamente, véase figura V.a. Mientras que el segundo estado: “Falla en Sensor” es cuando uno de los sensores se encuentra funcionando de manera defectuosa o se encuentra enviando valores erróneos, véase figura V.b.

Cada nodo sensorial inalámbrico ha sido programado para detectar un mal funcionamiento en cualquiera de sus sensores, mediante la propia calibración y funcionamiento de cada sensor, es así que si cada sensor se encuentra funcionando correctamente en la trama que envía el nodo se establecerá el primer estado, en el caso de registrarse un mal funcionamiento de algún sensor del nodo, la trama que se envía hacia la aplicación será con el segundo estado y en este caso la aplicación de escritorio mostrara que existe un error de funcionamiento en uno de los sensores de un nodo específico.

Finalmente en el recuadro sobre el estado de funcionamiento de los nodos de la interfaz gráfica de la aplicación tenemos la información acerca del estado de la batería de cada nodo, debido a que el consumo energético de cada nodo es primordial para la red sensorial inalámbrica es indispensable tener un control del porcentaje de energía disponible en cada nodo sensorial.



Figura V. Módulo Estado de Funcionamiento de los Nodos

Fuente: Los Autores

Acciones de la Interfaz Principal de la Aplicación de Escritorio

Para el manejo de la Aplicación de Escritorio en la interfaz gráfica de la misma se programó un conjunto de botones que permiten generar acciones en el funcionamiento de la aplicación y su conexión hacia la red de sensores inalámbrica, las acciones que se encuentran en la aplicación son: Determinar Conexión, Conectar o Desconectar, Sincronizar datos con el Servidor, Conectar con Servidor, Visualizar Mapas y Salir, véase figura VI.

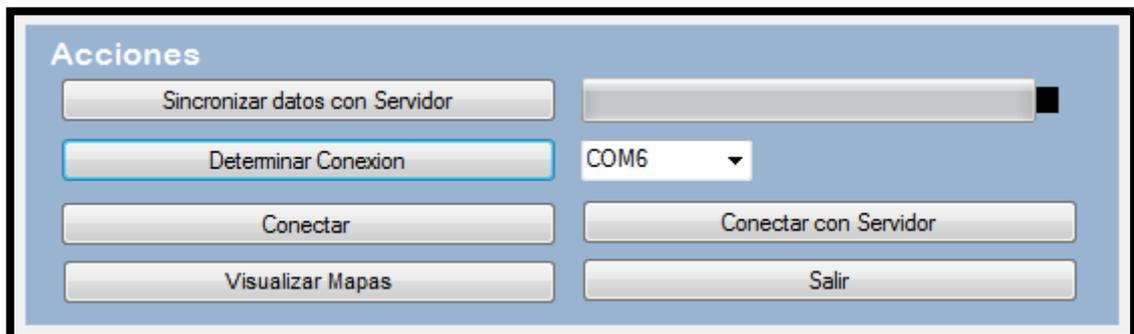


Figura VI. Acciones de la Aplicación de Escritorio

Fuente: Los Autores

Para las acciones de “Determinar Conexión” y “Conectar”, se programó los botones de la interfaz en base a que el mecanismo de conectividad entre la aplicación de escritorio y la red de sensores inalámbrica es mediante una conexión serial entre el nodo Coordinador de la red WSN y el ordenador en el cual está montada la aplicación y el Servidor Web, esta conexión se da mediante puertos USB entre el hardware del nodo coordinador compuesto por un módulo Arduino y el Ordenador el cual establece un Puerto COM para la comunicación con el módulo Arduino del nodo coordinador, es así que en la aplicación de escritorio lo que se busca es leer los datos que ingresan por el puerto COM con el cual se estableció la comunicación en el ordenador. En primer lugar mediante la acción de: “Determinar Conexión”, véase figura V.6, se puede establecer el valor del puerto COM que se asignó en el ordenador para la conexión serial, una vez generado el puerto de la comunicación se puede establecer una conexión con el nodo coordinador de la red WSN y esto se lo realiza mediante la acción: “Conectar”, véase figura V.6, para que la aplicación logre establecer la conexión con el puerto COM en el cual se encuentra la información que se recibe de la red WSN, de tal forma que después de lograr establecer la lectura del puerto COM del ordenador, la aplicación empieza a procesar los datos recibidos y los envía hacia los módulos de Comunicación de Nodos y de Recepción de Datos descritos anteriormente para su visualización total en la interfaz gráfica principal de la aplicación.

La acción programada en el botón: “Sincronizar datos con Servidor”, véase figura VII, permite generar un archivo de texto en el cual se almacena toda la información enviada por los nodos sensoriales de la red inalámbrica hacia un servidor Web montado en el mismo ordenador, es decir en este archivo de texto se almacenan de manera ordenada todos los valores que envía cada sensor de cada nodo sensorial de la red.

Toda la información de la temperatura, humedad, presencia de humo, y ubicación de cada nodo sensorial, así como los valores sobre el funcionamiento de cada sensor y el estado de batería de cada nodo son almacenados en un archivo de texto el cual se crea se crea según la fecha que fue generado y mediante la acción de sincronización este archivo es enviado hacia una carpeta

de almacenamiento de información del Servidor Web para su posterior visualización desde cualquier lugar, si este servidor tiene acceso hacia Internet.



Figura VII. Sincronización con Servidor, proceso de cargado

Fuente: Los Autores

Mediante la acción del botón: “Conectar con Servidor”, véase figura VI, se puede acceder haciendo uso de un navegador web hacia el Servidor Web que se encuentra montado en el mismo ordenador el cual contiene todos los archivos que se han generado en la aplicación con la información de la Red de Sensores Inalámbrica y que han sido sincronizados hacia el servidor.

En la programación del botón: “Visualizar Mapas”, véase figura VI, la acción que se realiza es generar una nueva interfaz dentro de la aplicación de escritorio en la cual vamos a tener la opción de generar mapas virtuales de la ubicación geográfica de cada nodo o mota que se encuentra en la Red Sensorial Inalámbrica, esta sub-interfaz de la aplicación se denomina: “Interfaz Ubicación”

Interfaz de Ubicación

En esta sub-interfaz de la aplicación de escritorio se puede realizar la generación de mapas virtuales geográficos mediante la herramienta de google-maps para la ubicación de los diferentes nodos sensoriales de la WSN, es decir se programó un interfaz en la cual mediante los valores de ubicación geográfica tanto de latitud como de longitud enviados por cada nodo sensorial de la WSN se puede graficar un mapa virtual en el cual se ubica el nodo y los puntos de acceso más cercanos hacia el mismo, véase figura VIII.



Figura VIII. Interfaz de Ubicación Mapas Virtuales

Fuente: Los Autores

Mediante la acción programada en el botón de “Ubicar”, se puede seleccionar el nodo que se desee visualizar con su ubicación e inmediatamente la aplicación genera el mapa virtual en el cual se encuentra el nodo deseado. Esta interfaz también se encuentra asociada con la interfaz de alertas, ya que al momento de existir una alerta en la aplicación en esta interfaz también se puede graficar la ubicación del nodo que generó la alerta dentro de la WSN.

Interfaz de Alertas

En la interfaz gráfica final de la aplicación de escritorio se manejan todas las alertas sobre la detección de posibles incendios forestales que llegan desde la Red de Sensores Inalámbrica, es decir cuando cualquiera de los nodos o motas de la Red de Sensores Inalámbrica detecta un cambio brusco de temperatura o la presencia de humo en el área monitoreada, esta información es enviada hacia la aplicación de escritorio la cual mediante el uso de su interfaz gráfica de Alertas genera la alerta en tiempo real sobre el nodo que genero la alerta y el lugar en donde este se encuentra, véase figura IX.



Figura IX. Interfaz de Alertas

Fuente: Los Autores

Una vez que se haya generado la alerta de la posible emergencia dentro de la aplicación mediante su interfaz de alertas, en la misma se pueden visualizar valores complementarios de ayuda para una mejor atención de la posible alerta dentro del área forestal, entre estos valores tenemos los siguientes:

- Ubicación: hace referencia al nodo que generó la alerta.
- Hora y fecha: establece la hora y fecha en la cual se generó la alerta del nodo de la WSN.
- Tiempo de Llegada: hace referencia a una aproximación del tiempo que se puede demorar en llegar una entidad de emergencia al lugar donde se generó la alerta, este aproximado de tiempo de llegada se calcula mediante la distancia de la ubicación en la que se encuentra la entidad de emergencias hasta la ubicación del nodo que generó la alerta dentro de la WSN.

Finalmente mediante la acción de “Ubicar en el Mapa”, se puede tener una sincronización con la Interfaz de Ubicación para obtener el mapa virtual de la ubicación del nodo que generó la alerta dentro de la Red de Sensores Inalámbrica.

Anexo II

Archivo de simulación NS-2: Simulación_XbeeS2.tcl

```
#####SIMULACION XBEE SERIE 2#####
#Parametros de Simulacion WSN
set val(chan) Channel/WirelessChannel
set val(prop) Propagation/TwoRayGround
set val(netif) Phy/WirelessPhy/802_15_4
set val(mac) Mac/802_15_4
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll) LL
set val(ant) Antenna/OmniAntenna
set val(ifqlen) 150
set val(nn) 11
set val(rp) AODV
set val(x) 200
set val(y) 200
set val(nam) tree.nam
set val(traffic) cbr

proc getCmdArgu {argc argv} {
    global val
    for {set i 0} {$i < $argc} {incr i} {
        set arg [lindex $argv $i]
        if {[string range $arg 0 0] != "-"} continue
        set name [string range $arg 1 end]
        set val($name) [lindex $argv [expr $i+1]]
    }
}

#Eventos de la red
getCmdArgu $argc $argv
set appTime1 8.1
set appTime2 8.3
set appTime3 8.5
set appTime4 8.7
set appTime5 8.9
set stopTime 100

# Inicio de variables Globales
set ns_ [new Simulator]
set tracefd [open Simulacion.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd
if { "$val(nam)" == "Simulacion.nam" } {
    set namtrace [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
    $ns_ use-newtrace
}

$ns_ puts-nam-traceall {# nam4wpan #}
Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on
#Definir parametro de Recepcion ##Sensibilidad Disp y Potencia Recibida
Phy/WirelessPhy set CStresh_ 3.16e-10
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 3.84e-09
#Definir la frecuencia de trabajo
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.4e+09
#Parametro de colisiones
Phy/WirelessPhy set CPTresh_ 10
#Configuración de objeto topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
#Creación del God
set god_ [create-god $val(nn)]
set chan_1_ [new $val(chan)]

#Configuración de características del nodo
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqlen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
    -energyModel "EnergyModel" \
    -initialEnergy 5760 \
    -txPower 0.2 \
    -channel $chan_1

#Configuración de nuevo formato de trazas
$ns_ set WirelessNewTrace_ON
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node($i) [$ns_ node
        $node($i) random-motion 0
    }
}

#Ubicación de los nodos
$node_0 set X_ 30
$node_0 set Y_ 40
$node_0 set Z_ 0
$node_1 set X_ 22
$node_1 set Y_ 32
$node_1 set Z_ 0
$node_2 set X_ 35
$node_2 set Y_ 32
$node_2 set Z_ 0
$node_3 set X_ 13.5
$node_3 set Y_ 24
$node_3 set Z_ 0
$node_4 set X_ 29
$node_4 set Y_ 24
$node_4 set Z_ 0
$node_5 set X_ 40
$node_5 set Y_ 23
$node_5 set Z_ 0
$node_6 set X_ 9
$node_6 set Y_ 14
$node_6 set Z_ 0
$node_7 set X_ 16.5
$node_7 set Y_ 13
$node_7 set Z_ 0
$node_8 set X_ 24
$node_8 set Y_ 13
$node_8 set Z_ 0
$node_9 set X_ 34
$node_9 set Y_ 13.5
$node_9 set Z_ 0
$node_10 set X_ 44
$node_10 set Y_ 13
$node_10 set Z_ 0

$ns_ at 0.0 "$node_0" NodeLabel Coordinador"
$ns_ at 0.0 "$node_0" sscs startPANCoord 1"
$ns_ at 0.5 "$node_1" sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 1.5 "$node_2" sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 2.5 "$node_3" sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 3.5 "$node_4" sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 4.5 "$node_5" sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 5.5 "$node_6" sscs startDevice 0"
$ns_ at 5.8 "$node_7" sscs startDevice 0"
$ns_ at 6.5 "$node_8" sscs startDevice 0"
$ns_ at 6.8 "$node_9" sscs startDevice 0"
$ns_ at 7.0 "$node_10" sscs startDevice 0"

#Definición del trafico en la Red
$ns_ at 6.0 "$node_3" sscs stopBeacon"
$ns_ at 8.0 "$node_3" sscs startBeacon"
$ns_ at 9.0 "$node_5" sscs startBeacon 4 4"
$ns_ at 10.0 "$node_4" sscs stopBeacon"
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 3ms
$ns_ at $appTime1 puts "\nTransmision de datos..\n"
# Configuración de flujo de tráfico entre nodos
proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node
    set udp_($src) [new Agent/UDP]
    eval $ns_ attach-agent $node($src) \($udp_($src)
    set null_($dst) [new Agent/Null]
    eval $ns_ attach-agent $node($dst) \($null_($dst)
    set cbr_($src) [new Application/Traffic/CBR]
    eval \($cbr_($src) set packetSize_ 150
    eval \($cbr_($src) set interval_ $interval
    eval \($cbr_($src) set random_ 0
    eval \($cbr_($src) set maxpkts_ 10000
    eval \($cbr_($src) attach-agent \($udp_($src)
    eval $ns_ connect \($udp_($src) \($null_($dst)
    $ns_ at $starttime \($cbr_($src) start"
}

if { (" $val(traffic)" == "cbr" ) } {
    puts "\nTraffic: $val(traffic)"
    puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data]]
    $ns_ at $appTime1 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.50ms"
    $ns_ at [expr $appTime1 + 0.5] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.5ms"
    $val(traffic)traffic 6 0 0.2 $appTime1
    $val(traffic)traffic 7 0 0.2 $appTime2
    $val(traffic)traffic 8 0 0.2 $appTime3
    $val(traffic)traffic 9 0 0.2 $appTime4
    $val(traffic)traffic 10 0 0.2 $appTime5
    $ns_ at $appTime1 "$node_6" add-mark m1 blue circle"
    $ns_ at $appTime1 "$node_0" add-mark m2 blue circle"
    $ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) $val(traffic) traffic from node 6 to node 0\""
    $ns_ at $appTime2 "$node_7" add-mark m3 yellow circle"
    $ns_ at $appTime2 "$node_0" add-mark m4 yellow circle"
    $ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime2) $val(traffic) traffic from node 7 to node 0\""
    $ns_ at $appTime3 "$node_8" add-mark m5 brown circle"
    $ns_ at $appTime3 "$node_0" add-mark m6 brown circle"
    $ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) $val(traffic) traffic from node 8 to node 0\""
    $ns_ at $appTime4 "$node_9" add-mark m7 red circle"
    $ns_ at $appTime4 "$node_0" add-mark m8 red circle"
    $ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime4) $val(traffic) traffic from node 9 to node 0\""
    $ns_ at $appTime5 "$node_10" add-mark m9 green4 circle"
    $ns_ at $appTime5 "$node_0" add-mark m10 green4 circle"
    $ns_ at $appTime5 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5) $val(traffic) traffic from node 10 to node 0\""
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p MAC -c navy
    if { "$val(traffic)" == "cbr" } {
        set pktType cbr
    } else {
        set pktType exp
    }
}
}
```

Anexo III

Archivo de simulación NS-2: Simulación_XbeePro_2,4GHz.tcl

```
#####SIMULACION XBEE PRO 2,4 GHz #####
#Parametros de Simulacion WSN
set val(chan) Channel/WirelessChannel
set val(prop) Propagation/TwoRayGround
set val(netif) Phy/WirelessPhy/802_15_4
set val(mac) Mac/802_15_4
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll) LL
set val(ant) Antenna/OmniAntenna
set val(ifqlen) 150
set val(nn) 11
set val(rp) AODV
set val(x) 200
set val(y) 200
set val(nam) tree.nam
set val(traffic) cbr

proc getCmdArgv {argc argv} {
    global val
    for {set i 0} {$i < $argc} {incr i} {
        set arg [lindex $argv $i]
        if {[string range $arg 0 0] != "-"} continue
        set name [string range $arg 1 end]
        set val($name) [lindex $argv [expr $i+1]]
    }
}

#####Eventos de la red
getCmdArgv $argc $argv
set appTime1 8.1
set appTime2 8.3
set appTime3 8.5
set appTime4 8.7
set appTime5 8.9
set stopTime 100
# Inicio de variables Globales
set ns_ [new Simulator]
set tracefd [open Simulacion.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd
if { "$val(nam)" == "Simulacion.nam" } {
    set namtrace [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
    $ns_ use-newtrace
}
$ns_ puts-nam-traceall {# nam4wpn #}
Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on
#Definir parametro de Recepcion ##Sensibilidad Disp y Potencia Recibida
Phy/WirelessPhy set Csthresh_1e-10
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 8.09e-8
#Definir la frecuencia de trabajo
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.4e+09
#Parametro de colisiones
Phy/WirelessPhy set CPTthresh_ 10
#Configuración de objeto topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
#Creación del God
set god_ [create-god $val(nn)]
set chan_1_ [new $val(chan)]

#Configuración de características del nodo
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqlen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
    -energyModel "EnergyModel" \
    -initialEnergy 5760 \
    -txPower 63 \
    -channel $chan_1_

#Configuración de nuevo formato de trazas
$ns_ set WirelessNewTrace_ON
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0
}

#Ubicación de los nodos
$node_(0) set X_ 30
$node_(0) set Y_ 40
$node_(0) set Z_ 0
$node_(1) set X_ 22
$node_(1) set Y_ 32
$node_(1) set Z_ 0
$node_(2) set X_ 35
$node_(2) set Y_ 32
$node_(2) set Z_ 0
$node_(3) set X_ 13.5
$node_(3) set Y_ 24
$node_(3) set Z_ 0
$node_(4) set X_ 29
$node_(4) set Y_ 24
$node_(4) set Z_ 0
$node_(5) set X_ 40
$node_(5) set Y_ 23
$node_(5) set Z_ 0
$node_(6) set X_ 9
$node_(6) set Y_ 14
$node_(6) set Z_ 0
$node_(7) set X_ 16.5
$node_(7) set Y_ 13
$node_(7) set Z_ 0
$node_(8) set X_ 24
$node_(8) set Y_ 13
$node_(8) set Z_ 0
$node_(9) set X_ 34
$node_(9) set Y_ 13.5
$node_(9) set Z_ 0
$node_(10) set X_ 44
$node_(10) set Y_ 13
$node_(10) set Z_ 0
$ns_ at 0.0 "$node_(0) NodeLabel Coordinador"
$ns_ at 0.0 "$node_(0) sscs startPANCoord 1"
$ns_ at 0.5 "$node_(1) sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 1.5 "$node_(2) sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 2.5 "$node_(3) sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 3.5 "$node_(4) sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 4.5 "$node_(5) sscs startDevice 1 1 1"
$ns_ at 5.5 "$node_(6) sscs startDevice 0"
$ns_ at 5.8 "$node_(7) sscs startDevice 0"
$ns_ at 6.5 "$node_(8) sscs startDevice 0"
$ns_ at 6.8 "$node_(9) sscs startDevice 0"
$ns_ at 7.0 "$node_(10) sscs startDevice 0"

#Definición del trafico en la Red
$ns_ at 6.0 "$node_(3) sscs stopBeacon"
$ns_ at 8.0 "$node_(3) sscs startBeacon"
$ns_ at 9.0 "$node_(5) sscs startBeacon 4 4"
$ns_ at 10.0 "$node_(4) sscs stopBeacon"
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 3ms
$ns_ at $appTime1 puts "\nTrasmission de datos..\n"
# Configuración de flujo de tráfico entre nodos
proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_
    set udp_($src) [new Agent/UDP]
    eval $ns_ attach-agent $node_($src) $udp_($src)
    set null_($dst) [new Agent/Null]
    eval $ns_ attach-agent $node_($dst) $null_($dst)
    set cbr_($src) [new Application/Traffic/CBR]
    eval $cbr_($src) set packetSize_ 150
    eval $cbr_($src) set interval_ $interval
    eval $cbr_($src) set maxpkts_ 10000
    eval $cbr_($src) attach-agent $udp_($src)
    eval $ns_ connect $udp_($src) $null_($dst)
    $ns_ at $starttime "$cbr_($src) start"
}

if { ("${val(traffic)}" == "cbr") } {
    puts "\nTraffic: $val(traffic)"
    puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data]]
    $ns_ at $appTime1 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.50ms"
    $ns_ at [expr $appTime1 + 0.5] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.5ms"
    $val(traffic)traffic 6 0 0.2 $appTime1
    $val(traffic)traffic 7 0 0.2 $appTime2
    $val(traffic)traffic 8 0 0.2 $appTime3
    $val(traffic)traffic 9 0 0.2 $appTime4
    $val(traffic)traffic 10 0 0.2 $appTime5
    $ns_ at $appTime1 "$node_(6) add-mark m1 blue circle"
    $ns_ at $appTime1 "$node_(0) add-mark m2 blue circle"
    $ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) $val(traffic) traffic from node 6 to node 0\""
    $ns_ at $appTime2 "$node_(7) add-mark m3 yellow circle"
    $ns_ at $appTime2 "$node_(0) add-mark m4 yellow circle"
    $ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime2) $val(traffic) traffic from node 7 to node 0\""
    $ns_ at $appTime3 "$node_(8) add-mark m5 brown circle"
    $ns_ at $appTime3 "$node_(0) add-mark m6 brown circle"
    $ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) $val(traffic) traffic from node 8 to node 0\""
    $ns_ at $appTime4 "$node_(9) add-mark m7 red circle"
    $ns_ at $appTime4 "$node_(0) add-mark m8 red circle"
    $ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime4) $val(traffic) traffic from node 1 to node 6\""
    $ns_ at $appTime5 "$node_(10) add-mark m9 green4 circle"
    $ns_ at $appTime5 "$node_(0) add-mark m10 green4 circle"
    $ns_ at $appTime5 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5) $val(traffic) traffic from node 10 to node 0\""
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p MAC -c navy
    if { "$val(traffic)" == "cbr" } {
        set pktType cbr
    } else {
        set pktType exp
    }
}
}
```

Anexo IV

Archivo de simulación NS-2: Simulación_XbeePro_900MHz.tcl

```
#####SIMULACION XBEE PRO 900 MHz #####
#Parametros de Simulacion WSN
set val(chan) Channel/WirelessChannel
set val(prop) Propagation/TwoRayGround
set val(netif) Phy/WirelessPhy/802_15_4
set val(mac) Mac/802_15_4
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll) LL
set val(ant) Antenna/OmniAntenna
set val(ifqlen) 150
set val(nn) 11
set val(rp) AODV
set val(x) 200
set val(y) 200
set val(nam) tree.nam
set val(traffic) cbr
proc getCmdArgu {argc argv} {
    global val
    for {set i 0} {$i < $argc} {incr i} {
        set arg [lindex $argv $i]
        if {[string range $arg 0 0] != "-"} continue
        set name [string range $arg 1 end]
        set val($name) [lindex $argv [expr $i+1]]
    }
}

#Eventos de la red
getCmdArgu $argc $argv
set appTime1 8.1
set appTime2 8.3
set appTime3 8.5
set appTime4 8.7
set appTime5 8.9
set stopTime 100
# Inicio de variables Globales
set ns_ [new Simulator]
set tracefd [open Simulacion.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd
if { "$val(nam)" == "Simulacion.nam" } {
    set namtrace [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
    $ns_ use-newtrace
}
$ns_ puts-nam-traceall {# nam4wpan #}
Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on
#Definir parametro de Recepcion ##Sensibilidad Disp y Potencia Recibida
Phy/WirelessPhy set CStresh_ 1e-10
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 6.829e-07
#Definir la frecuencia de trabajo
Phy/WirelessPhy set freq_ 902e+06
#Parametro de colisiones
Phy/WirelessPhy set CPTresh_ 10
#Configuración de objeto topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
#Creación del God
set god_ [create-god $val(nn)]
set chan_1_ [new $val(chan)]

#Configuración de características del nodo
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
    -energyModel "EnergyModel" \
    -initialEnergy 5760 \
    -txPower 50 \
    -channel $chan_1_
#Configuración de nuevo formato de trazas
$ns_ set WirelessNewTrace_ON
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node($i) [$ns_ node]
    $node($i) random-motion 0 ;#
}

#Ubicación de los nodos
$node_0 set X_ 30 $node_8 set X_ 24
$node_0 set Y_ 40 $node_8 set Y_ 13
$node_0 set Z_ 0 $node_8 set Z_ 0
$node_1 set X_ 22 $node_9 set X_ 34
$node_1 set Y_ 32 $node_9 set Y_ 13.5
$node_1 set Z_ 0 $node_9 set Z_ 0
$node_2 set X_ 35 $node_10 set X_ 44
$node_2 set Y_ 32 $node_10 set Y_ 13
$node_2 set Z_ 0 $node_10 set Z_ 0
$node_3 set X_ 13.5 $ns_ at 0.0 "$node_0 NodeLabel Coordinador"
$node_3 set Y_ 24 $ns_ at 0.0 "$node_0 sscs startPANCoord 1"
$node_3 set Z_ 0 $ns_ at 0.5 "$node_1 sscs startDevice 1 1 1"
$node_4 set X_ 29 $ns_ at 1.5 "$node_2 sscs startDevice 1 1 1"
$node_4 set Y_ 24 $ns_ at 2.5 "$node_3 sscs startDevice 1 1 1"
$node_4 set Z_ 0 $ns_ at 3.5 "$node_4 sscs startDevice 1 1 1"
$node_5 set X_ 40 $ns_ at 4.5 "$node_5 sscs startDevice 1 1 1"
$node_5 set Y_ 23 $ns_ at 5.5 "$node_6 sscs startDevice 0"
$node_5 set Z_ 0 $ns_ at 5.8 "$node_7 sscs startDevice 0"
$node_6 set X_ 9 $ns_ at 6.5 "$node_8 sscs startDevice 0"
$node_6 set Y_ 14 $ns_ at 6.8 "$node_9 sscs startDevice 0"
$node_6 set Z_ 0 $ns_ at 7.0 "$node_10 sscs startDevice 0"
$node_7 set X_ 16.5
$node_7 set Y_ 13
$node_7 set Z_ 0

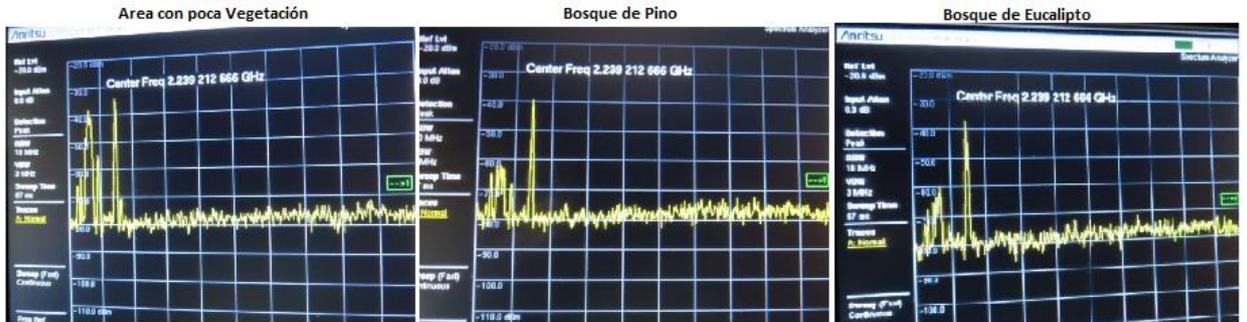
#Definición del trafico en la Red
$ns_ at 6.0 "$node_3 sscs stopBeacon"
$ns_ at 8.0 "$node_3 sscs startBeacon"
$ns_ at 9.0 "$node_5 sscs startBeacon 4 4"
$ns_ at 10.0 "$node_4 sscs stopBeacon"
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 3ms
$ns_ at $appTime1 puts "\nTransmision de datos.\n"
# Configuración de Flujo de tráfico entre nodos
proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node
    set udp_($src) [new Agent/UDP]
    eval $ns_ attach-agent $node_($src) \ $udp_($src)
    set null_($dst) [new Agent/Null]
    eval $ns_ attach-agent $node_($dst) \ $null_($dst)
    set cbr_($src) [new Application/Traffic/CBR]
    eval \ $cbr_($src) set packetSize_ 150
    eval \ $cbr_($src) set interval_ $interval
    eval \ $cbr_($src) set random_ 0
    eval \ $cbr_($src) set maxpkts_ 10000
    eval \ $cbr_($src) attach-agent \ $udp_($src)
    eval $ns_ connect \ $udp_($src) \ $null_($dst)
    $ns_ at $starttime "$cbr_($src) start"
}

if { "$val(traffic)" == "cbr" } {
    puts "\nTraffic: $val(traffic)"
    puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data]]
    $ns_ at $appTime1 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.50ms"
    $ns_ at [expr $appTime1 + 0.5] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.5ms"
    $val(traffic)traffic 6 0 0.2 $appTime1
    $val(traffic)traffic 7 0 0.2 $appTime2
    $val(traffic)traffic 8 0 0.2 $appTime3
    $val(traffic)traffic 9 0 0.2 $appTime4
    $val(traffic)traffic 10 0 0.2 $appTime5
    $ns_ at $appTime1 "$node_6 add-mark m1 blue circle"
    $ns_ at $appTime1 "$node_0 add-mark m2 blue circle"
    $ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) $val(traffic) traffic from node 6 to node 0\""
    $ns_ at $appTime2 "$node_7 add-mark m3 yellow circle"
    $ns_ at $appTime2 "$node_0 add-mark m4 yellow circle"
    $ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime2) $val(traffic) traffic from node 7 to node 0\""
    $ns_ at $appTime2 "$node_8 add-mark m5 brown circle"
    $ns_ at $appTime3 "$node_0 add-mark m6 brown circle"
    $ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) $val(traffic) traffic from node 8 to node 0\""
    $ns_ at $appTime4 "$node_9 add-mark m7 red circle"
    $ns_ at $appTime4 "$node_0 add-mark m8 red circle"
    $ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime4) $val(traffic) traffic from node 1 to node 6\""
    $ns_ at $appTime5 "$node_10 add-mark m9 green4 circle"
    $ns_ at $appTime5 "$node_0 add-mark m10 green4 circle"
    $ns_ at $appTime5 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5) $val(traffic) traffic from node 10 to node 0\""
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
    Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p MAC -c navy
    if { "$val(traffic)" == "cbr" } {
        set pktType cbr
    } else {
        set pktType exp
    }
}
}
```

Anexo V

Mediciones de señal recibida en el nodo Sensorial con Analizador de Espectro en cada escenario ambiental

Mediciones a 20 metros de distancia del nodo coordinador:



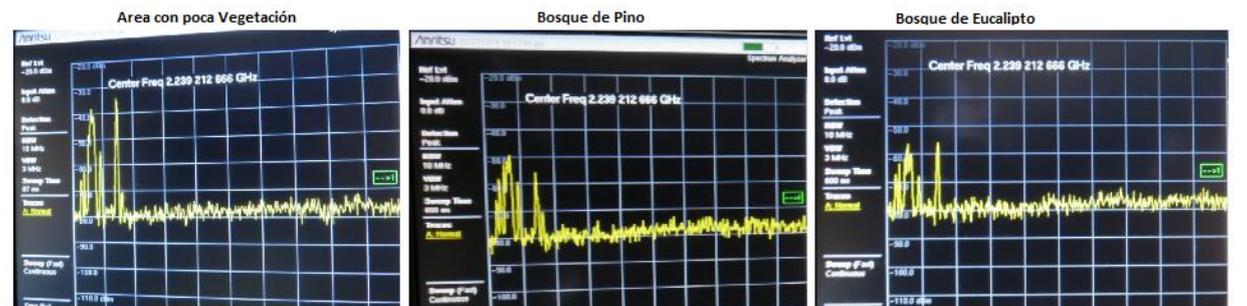
Mediciones a 40 metros de distancia del nodo coordinador:



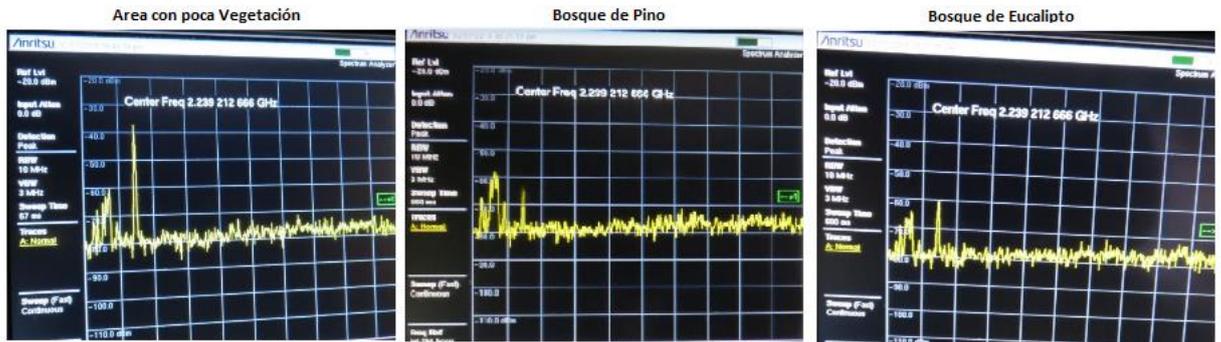
Mediciones a 60 metros de distancia del nodo coordinador:



Mediciones a 80 metros de distancia del nodo coordinador:



Mediciones a 100 metros de distancia del nodo coordinador:

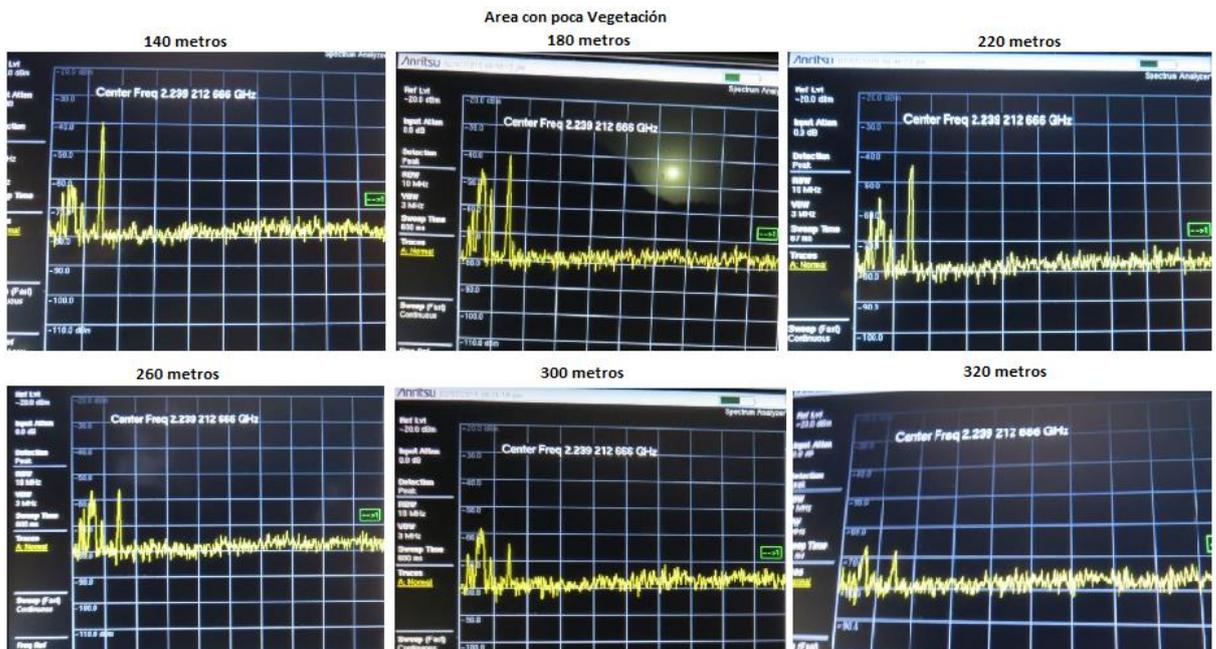


Mediciones a 120 metros de distancia del nodo coordinador:



A partir de esta distancia en los escenarios de bosque de pino y bosque de eucalipto se pierde totalmente la transmisión de datos, por lo cual solo se tiene valores de señal recibida del escenario forestal con poca vegetación.

Mediciones de señal recibida a diferentes distancias del nodo coordinador, hasta cuando se pierde totalmente la transmisión de datos:



Anexo VI

Datasheet, Manual de usuario versión Xbee Pro 2,4 GHz

1. XBee®/XBee-PRO® RF Modules

The XBee and XBee-PRO RF Modules were engineered to meet IEEE 802.15.4 standards and support the unique needs of low-cost, low-power wireless sensor networks. The modules require minimal power and provide reliable delivery of data between devices.

The modules operate within the ISM 2.4 GHz frequency band and are pin-for-pin compatible with each other.



Key Features

Long Range Data Integrity

XBee

- Indoor/Urban: up to 100' (30 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 300' (90 m)
- Transmit Power: 1 mW (0 dBm)
- Receiver Sensitivity: -92 dBm

XBee-PRO

- Indoor/Urban: up to 300' (90 m), 200' (60 m) for International variant
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1600 m), 2500' (750 m) for International variant
- Transmit Power: 63mW (18dBm), 10mW (10dBm) for International variant
- Receiver Sensitivity: -100 dBm

RF Data Rate: 250,000 bps

Advanced Networking & Security

Retries and Acknowledgements
DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Each direct sequence channels has over 65,000 unique network addresses available
Source/Destination Addressing
Unicast & Broadcast Communications
Point-to-point, point-to-multipoint and peer-to-peer topologies supported

Low Power

XBee

- TX Peak Current: 45 mA (@3.3 V)
- RX Current: 50 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

XBee-PRO

- TX Peak Current: 250mA (150mA for international variant)
- TX Peak Current (RPSMA module only): 340mA (180mA for international variant)
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10 μ A

ADC and I/O line support

Analog-to-digital conversion, Digital I/O
I/O Line Passing

Easy-to-Use

No configuration necessary for out-of-box RF communications
Free X-CTU Software (Testing and configuration software)
AT and API Command Modes for configuring module parameters
Extensive command set
Small form factor

Worldwide Acceptance

FCC Approval (USA) Refer to Appendix A [p64] for FCC Requirements. Systems that contain XBee®/XBee-PRO® RF Modules inherit Digi Certifications.

ISM (Industrial, Scientific & Medical) 2.4 GHz frequency band

Manufactured under **ISO 9001:2000** registered standards

XBee®/XBee-PRO® RF Modules are optimized for use in the United States, Canada, Australia, Japan, and Europe. Contact Digi for complete list of government agency approvals.



Specifications

Table 1-01. Specifications of the XBee®/XBee-PRO® RF Modules

Specification	XBee	XBee-PRO
Performance		
Indoor/Urban Range	Up to 100 ft (30 m)	Up to 300 ft (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant
Outdoor RF line-of-sight Range	Up to 300 ft (90 m)	Up to 1 mile (1600 m), up to 2500 ft (750 m) international variant
Transmit Power Output (software selectable)	1mW (0 dBm)	63mW (18dBm)* 10mW (10 dBm) for International variant
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 bps - 250 kbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps - 250 kbps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements		
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Transmit Current (typical)	45mA (@ 3.3 V)	250mA (@3.3 V) (150mA for international variant) RPSMA module only: 340mA (@3.3 V) (180mA for international variant)
Idle / Receive Current (typical)	50mA (@ 3.3 V)	55mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 10 μ A	< 10 μ A
General		
Operating Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector
Networking & Security		
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint & Peer-to-peer	
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels	12 Direct Sequence Channels
Addressing Options	PAN ID, Channel and Addresses	PAN ID, Channel and Addresses
Agency Approvals		
United States (FCC Part 15.247)	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
Industry Canada (IC)	4214A XBEE	4214A XBEEPRO
Europe (CE)	ETSI	ETSI (Max. 10 dBm transmit power output)*
Japan	R201WW07215214	R201WW08215111 (Max. 10 dBm transmit power output)*
Australia	C-Tick	C-Tick

* See Appendix A for region-specific certification requirements.

Antenna Options: The ranges specified are typical when using the integrated Whip (1.5 dBi) and Dipole (2.1 dBi) antennas. The Chip antenna option provides advantages in its form factor; however, it typically yields shorter range than the Whip and Dipole antenna options when transmitting outdoors. For more information, refer to the "XBee Antennas" Knowledgebase Article located on Digi's Support Web site

The XBee and XBee-PRO RF Modules are pin-for-pin compatible.

