



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA**

AUTOR: MARTINEZ CHICANGO HECTOR STALIN

**TEMA: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE SENSORES
INALAMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE
INFRAESTRUCTURAS CRITICAS DE PUENTES**

DIRECTOR: ING.DARWIN AGUILAR

CODIRECTOR: ING. PAUL BERNAL

SANGOLQUI – MARZO 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO

Ing. Darwin Aguilar

Ing. Paúl Bernal

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado “EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRITICAS DE PUENTES”, realizado por Héctor Stalin Martínez Chicango, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

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

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a Héctor Stalin Martínez Chicango que lo entregue al Ingeniero Darío Duque, en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, 24 de Marzo de 2014

Ing. Darwin Aguilar

DIRECTOR

Ing. Paúl Bernal

CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Héctor Stalin Martínez Chicango

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS DE PUENTES”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

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

Sangolquí, 24 de Marzo de 2014

Héctor Stalin Martínez Chicango

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Héctor Stalin Martínez Chicango

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRITICAS DE PUENTES”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría

Sangolquí, 24 de Marzo de 2014

Héctor Stalin Martínez Chicango

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico de manera muy especial, a mis padres, que con su amor, y su apoyo incondicional, supieron guiarme por un buen camino dándome las fuerzas para seguir siempre adelante y superar cada obstáculo.

A mis hermanos, que siempre han estado a mi lado apoyándome en mi vida.

A mis abuelitos, que con su amor y consejos me ha dado enseñanzas para toda la vida.

A mis abuelitas, que me cuidan y protegen desde el cielo.

Y a todas las personas que de una u otra manera han colaboraron en la culminación de mis estudios.

AGRADECIMIENTO

Para todas las personas que de una u otra forma me ayudaron a lo largo de mi carrera y colaboraron de forma desinteresada para la realización y culminación de este proyecto de grado.

Un agradecimiento especial por la confianza depositada en mi persona al ayudarme con el tema de este proyecto y auspicio:

Al Ing. Darwin Aguilar, Director del proyecto, que supo guiarme en la realización del proyecto.

Al Ing. Paúl Bernal, Codirector del proyecto, por su acertada orientación y codirección.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1

DIAGNOSTICO DE ESTUDIO

1.1.	OBJETIVOS	1
1.1.1.	OBJETIVO GENERAL	1
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.2.	ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	2
1.3.	JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO	2
1.4.	ALCANCE DEL PROYECTO	3
1.5.	ALCANCE DEL PROYECTO	4

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO

2.1	INTRODUCCIÓN	6
2.2	MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS.....	8
2.2.1	CONTROL DE VIBRACIONES DE UN PUENTE	9
2.2.2	MONITORIZACIÓN DE LA SALUD DE UNA INFRAESTRUCTURA CIVIL “PUENTES” 20	20
2.3	REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS.	24
2.3.1	TOLERANCIA A FALLOS	26
2.3.2	ESCALABILIDAD	27
2.3.3	TIPOS DE SENSORES	28
2.3.4	TOPOLOGÍAS DE WSN	34
2.3.5	MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN.....	37
2.3.6	PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	38
2.4	ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....	39
2.4.1	NODO INALÁMBRICO	40
2.4.2	PUERTA DE ENLACE	46
2.4.3	ESTACIÓN BASE	47

2.5	ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 / ZIGBEE	47
2.5.1	CAPA FÍSICA PHY	50
2.5.2	CAPA DE ACCESO AL MEDIO MAC	54
2.5.3	CLASES DE REDES INALÁMBRICAS DE CORTO ALCANCE.....	64
2.5.4	RELACIÓN ENTRE ZIGBEE Y EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4.....	64
2.6	SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO	66
2.7	SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE LA RED WSN MEDIANTE NS2	66
2.7.1	SIMULACIÓN Y RESULTADOS	69
2.7.2	ANÁLISIS GRÁFICO DE LA SALIDA NAM.....	71
2.7.3	HERRAMIENTA TRACEGRAPH.....	72
2.7.4	MODELOS DE RADIO PROPAGACIÓN	73
2.7.5	PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO.....	77
2.7.6	SIMULACIÓN DE LA WSN MEDIANTE NS2.....	80

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA RED WSN

3.1	PLANIFICACIÓN DE LA RED	84
3.2	ENTORNO DE DESPLIEGUE (EDWIN PATRICIO AMAGUAÑA DÁVILA, TATIANA MAGALI APOLO CÁRDENAS , 2009)	85
3.3	ESQUEMA GENERAL DE LA RED (EDWIN PATRICIO AMAGUAÑA DÁVILA, TATIANA MAGALI APOLO CÁRDENAS , 2009)	87
3.4	RED DE TRANSPORTE.....	90
3.4.1	ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON RADIO MOBILE (GRUPO DE RADIOCOMUNICACIÓN, DEPARTAMENTO SSR, 2007)	90
3.4.2	ESPECIFICACIONES A CONSIDERARSE EN RADIO MOBILE (GRUPO DE RADIOCOMUNICACIÓN, DEPARTAMENTO SSR, 2007)	91
3.4.3	CÁLCULO DE DESVANECIMIENTOS.....	103
3.4.4	CÁLCULO DE INDISPONIBILIDAD DE LOS EQUIPOS (CARDENAS, 2011)	111
3.5	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE LOS SENSORES.....	118
3.6	TOLERANCIA A FALLAS (GRUPO DE RADIOCOMUNICACIÓN, DEPARTAMENTO SSR, 2007).....	119
3.7	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN NS2	123
3.8	TOPOLOGÍA DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS	124

3.9	SIMULACIÓN CON EL MODELO DE PROPAGACIÓN: TWORAYGROUND	125
3.10	TIPO DE SENSORES O MÓDULOS DE COMUNICACIÓN	149
3.11	SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN	150

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS POSIBLES DISPOSITIVOS

4.1	TECNOLOGÍA MICAZ (HEREDIA, 2008) (MARQUEZ, 2007)	152
4.1.1	REDES DE BAJO CONSUMO.....	152
4.1.2	CONVERSIÓN DE LA INFORMACIÓN (MARQUEZ, 2007) (JUAN SUARDÍAZ MURO, JUAN A. LÓPEZ RIQUELME, UNIVERSIDAD PONTIFICA DE CARTAGENA, JUAN JOSE GARCÍA HEREDIA, 2012)	154
4.1.3	PUERTA DE ENLACE Y ESTACIÓN BASE	156
4.1.4	SISTEMAS OPERATIVOS COMPATIBLES (MARQUEZ, 2007)	157
4.2	TECNOLOGÍA IMOTE2 (HEREDIA, 2008)	161
4.2.1	PLACA SENSORA	162
4.2.2	GATEWAY.....	162
4.2.3	SISTEMAS OPERATIVOS COMPATIBLES.....	163

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

5.1	PRUEBA DEL ALCANCE DE LOS MÓDULOS DE RADIO.....	169
5.2	IMPLEMENTACIÓN DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS. .	174
5.3	PRUEBA DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS (HEREDIA, 2008) (ORTEGA, 2012).....	179

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6	CONCLUSIONES	187
6.1	RECOMENDACIONES	189
6.2	TRABAJOS A FUTURO.....	190
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

-	
Figura.1. Martillo de impacto	14
Figura.2. Sistema de impacto	15
Figura.3. Acelerómetro piezoeléctrico	16
Figura.4. Instrumentación de un Acelerómetro	16
Figura. 5. Distribución de los elementos de la WSN con topología en estrella con fuente propia	35
Figura. 2. 6. Distribución de los elementos de la WSN con topología en estrella extendida (mayor cobertura)	36
Figura. 7. Combinación de la topología en estrella extendida con la topología en árbol para una WSN	36
Figura. 8. Red inalámbrica de sensores	40
Figura. 9. Arquitectura de un nodo inalámbrico	41
Figura. 10. Estándar IEEE 802.15.-2003	51
Figura. 11. Estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee	51
Figura. 12. Bandas de frecuencia de la capa física de IEEE 802.15.4	53
Figura. 13. Estructura del paquete de la capa física IEEE 802.15.4 PHY	54
Figura. 14. Opciones de acceso al medio inalámbrico en una WSN	55
Figura. 15. a) Estructura de Súper Trama, b) Estructura de la trama QoS, c) Estructura de la Súper trama con ahorro de energía	58
Figura. 16. Formato general de la trama MAC	59
Figura. 17. Formato de la trama Beacon	60
Figura. 18. Formato de la trama de Datos y Reconocimiento	61
Figura. 19. Formato de la trama de comandos MAC	62
Figura. 20. Comparación entre los estándares ZigBee, Bluetooth, IEEE 802.11	64
Figura.21. Capa modelo del protocolo inalámbrico ZigBee	65
Figura. 22. Protocolo de red IEEE802.15.4, que no contiene el estándar ZigBee	65
Figura. 23. Modelo de Wireless Sensor Network	67
Figura. 24. Funcionamiento del NS2	68
Figura. 25. Estructura del archivo de salida *.tr	70
Figura. 26. Interfaz gráfica de la herramienta NAM	71
Figura. 27. Interfaz de Trace Graph 2.2	72
Figura. 28. Red de sensores de la estación de monitoreo	82

CAPÍTULO 3

Figura. 29. Entorno de despliegue de la red de monitoreo	84
--	----

Figura. 30. Entorno de despliegue de la red de monitoreo.	85
Figura. 31. Punto de monitoreo, puente los Caras, Manabí.....	85
Figura. 32. Despliegue de la red de monitoreo utilizando Radio Mobile.	87
Figura. 33. Despliegue general de la red de monitoreo.....	88
Figura. 34. Dispositivos de sensores inalámbricos Crossbow para sensar vibraciones.	88
Figura. 35. Conexión de los equipos de medición y transmisión inalámbrica.	89
Figura. 36. Enlace Monitoreo a Repetidor.	93
Figura. 37. Perfil del enlace Monitoreo-Repetidor.	94
Figura. 38. Repetidor a Estación Base.....	98
Figura. 39. Perfil del enlace Repetidor-Estación Base.....	99
Figura. 40. Red de monitoreo.	113
Figura. 41. Angulo de elevación.	114
Figura. 42. Angulo de apuntamiento y Azimut.....	115
Figura. 43. Esquema General del sistema Fotovoltaico.	119
Figura. 44. Diagrama de conexión del regulador.....	123
Figura. 45. Topología de WSN, que corresponde a la estacion de monitoreo.....	124
Figura. 46. Propagación e intercambio de paquetes.....	138
Figura. 47. Network Information.	138
Figura. 48. Suma acumulada del Numero de Paquetes.....	140
Figura. 49. Suma acumulada del Numero de Bytes.....	140
Figura. 50. Throughput de bits generados.....	143
Figura. 51. Throughput de bits enviados.....	144
Figura. 52. Throughput de bits recibidos.....	144
Figura. 53. Throughput de bits reenviados.....	145
Figura. 54. Throughput de bits caidos.....	145
Figura. 55. Número de Paquetes.....	147
Figura. 56. Análisis del Número de Paquetes.....	148
Figura. 57. Jitter de Paquetes Recividos.....	149
Figura. 58. Tipos de baterias a) Niquel Cadmio, b) Litio, c) Niquel Metal Hydride.....	151

CAPÍTULO 4

Figura. 59. Stargate SPB400.	156
Figura. 60. Esquema Funcional de TinyOs.....	158
Figura. 61. Diagrama de Componentes en el Proceso de Compilación de una Aplicación WSN.....	159
Figura. 62. Plataforma Imote2 (Intel mote 2).....	161
Figura. 63. Placa Sensora para Imote2.....	162
Figura. 64. Placa de Desarrollo y Conexión para Imote2.....	162

CAPÍTULO 5

Figura. 65. Kit de Sensores Crossbow IRIS.	169
Figura. 66. Configuración de la Tarjeta de Interface.	170
Figura. 67. Firmware de los Motes IRIS.	171
Figura. 68. Configuración de la estación base IRIS.	171
Figura. 69. Configuración de los Motes IRIS.	172
Figura. 70. Despliegue de los nodos y Gateway.....	173
Figura. 71. Despliegue de la Red de Sensores.....	174
Figura. 72. Puente Peatonal, exteriores de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE.....	175
Figura. 73. Nodos sensores desplegados.....	175
Figura. 74. Despliegue de la Red de Monitoreo.....	176
Figura. 75. Puente de San Pedro-Valle de los Chillos.	176
Figura. 76. Despliegue de los nodos.....	176
Figura. 77. Comunicación entre equipo remoto y equipo de monitoreo.....	177
Figura. 78. Antenas Alvarion WIMAX, del enlace.	178
Figura. 79. Comunicación entre equipo remoto y equipo de monitoreo.....	178
Figura. 80. Comunicación entre equipo remoto y equipo de monitoreo.....	179
Figura. 81. Herramienta Xsniffer, empleada para escuchar el tráfico de la red de sensores.	179
Figura. 82. Herramienta Xsniffer, captura de los mensajes de la red de sensores.....	181
Figura. 83. Tiempo entre muestras adquiridas, Puente peatonal.	181
Figura. 84. Retardo de una mota dentro de la red de sensores, Puente peatonal.....	182
Figura. 85. Tiempo entre muestras adquiridas, Puente San Pedro.	182
Figura. 86. Retardo de una mota dentro de la red de sensores, Puente San Pedro. .	183
Figura. 87. Topología de la red-Puente peatonal.	184
Figura. 88. Topología de la red-Puente San Pedro.....	184
Figura. 89. Rendimiento de la red de sensores en el puente peatonal.....	185
Figura. 90. Rendimiento de la red de sensores en el puente San Pedro.	185

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla.1. Tipos de sensores según su magnitud física. Fuente: Tomada de referencia.....	30
Tabla. 2. Características de los transductores y sensores.	34
Tabla. 3. Características de dispositivos inalámbricos: Tomada de referencia.	44
Tabla. 4. Características de dispositivos inalámbricos: II Tomada de referencia.	44
Tabla. 5. Frecuencias de trabajo para IEEE 802.15.4 – 2003: Tomada de referencia.	50
Tabla. 6. Principales parámetros de la capa PHY IEEE 802.15.4: Tomada de referencia.....	52
Tabla. 7. Valores típicos del exponente β	76
Tabla. 8. Valores típicos de la desviación shadowing.....	77

CAPÍTULO 3

Tabla. 9. Ubicaciones de cada estación de monitoreo y repetidora.	86
Tabla. 10. Datos de especificaciones de el amplificador RF.....	90
Tabla. 11. Perfil Monitoreo-Repetidor.....	94
Tabla. 12. Características del enlace.....	95
Tabla. 13. Características del Terreno.	95
Tabla. 14. Perfil Repetidor-Estación Central.	98
Tabla. 15. Características del enlace.....	100
Tabla. 16. Características del Terreno.	100
Tabla. 17. Cuadro resumen de los cálculos de propagación de la Red.....	103
Tabla. 18. Tiempo Fuera de Servicio.....	107
Tabla. 19. Tiempo Fuera de Servicio.....	111
Tabla. 20. Altura de las Estaciones del primer enlace.	114
Tabla. 21. Altura de las Estaciones del segundo enlace.	116
Tabla. 22. Consumo de energía individual de las estaciones de monitoreo, de la repetidora y el subsistema de 7 WSN.....	118
Tabla. 23. Consumo de energía de la Unidad de Monitoreo.....	120
Tabla. 24. Consumo de energía de la Unidad de Monitoreo.	121
Tabla. 25. Características de la red de Sensores.....	136
Tabla. 26. Características de la Simulación.....	137
Tabla. 27. Resumen de los resultados de la simulación.	139
Tabla. 28. Resumen de los resultados de la simulación.	146
Tabla. 29. Resumen de valores de Delivery Ratio.....	146

Tabla. 30. Número de Paquetes.....	147
------------------------------------	-----

CAPÍTULO 4

Tabla. 31. Consumo del Procesador en MicaZ.....	153
Tabla. 32. Consumo del Sistema de Transmisión.....	153
Tabla. 33. Datos Obtenidos en un mensaje Tipo-Ejemplo.....	155
Tabla. 34. Tabla de Datos Convertidos en Mensaje Tipo.....	155
Tabla. 35. Características Generales de los Distintos Tipos de motes.....	164
Tabla. 36. Requerimientos de Energía para los Distintos Tipos de motes.....	165
Tabla. 37. Características Programación de los Distintos Tipos de motes.....	166
Tabla. 38. Rendimiento de los Distintos Tipos de motes.....	167

CAPÍTULO 5

Tabla. 39. Resultados de las pruebas realizadas.....	173
Tabla. 40. Características Generales de los Distintos Tipos de motes.....	182
Tabla. 41. Características Generales de los Distintos Tipos de motes.....	183

GLOSARIO

Ancho de Banda.- Medida del espectro utilizado o la capacidad de un determinado medio.

Antena.- Dispositivo usado para la transmisión o recepción de señales por aire.

CONATEL.- Consejo Nacional de Telecomunicaciones, encargado de emitir la reglamentación y la normativa respectiva para servicios de telecomunicaciones.

dBm.- Decibel referido a 1 mili-Watio.

Espectro Electromagnético.- Rango continuo de frecuencias de radiación electromagnética. Se mide en Hertz o ciclos por segundo. A mayor frecuencia el ciclo de repetición es más corto, o sea su longitud de onda disminuye.

Frecuencia.- Es la cantidad de veces por segundo que se repite una señal alterna.

RF.- Radiofrecuencia.

Ruido.- Señales aleatorias e imprevisibles del tipo eléctrico originadas en forma natural dentro o fuera del sistema. Cuando estas variaciones se agregan a la señal portadora de la información, esta puede quedar en gran parte oculta o eliminada totalmente.

SNR.- Relación Señal a Ruido.

UIT.- Unión Internacional de Telecomunicaciones, Organismo internacional que expide normativas técnicas para el sector de telecomunicaciones.

SIG.- Sistema de Información Geográfica.

GPS.- Global Positioning System, Sistema de Posición Geográfica.

WSN.- Wireless Sensor Network, Red de Sensores Inalámbricos.

IEEE.- Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

PHY.- Physical Layer Protocol, Protocolo de la capa física.

MAC.- Media Access Control, Control de Acceso al Medio.

WPAN Wireless.- Personal Area Networks, Redes de Area personal.

WLAN.- Wireless Lan Area Network

MB-OFDM.- Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

Zigbee.- Conjunto de protocolos de alto nivel basado en el estándar 802.15.4.

DSSS.- Direct Sequence Spread Spectrum.

PSDU PHY.- Service Data Unit.

CSMA/CD.- Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, Acceso Múltiple por Detección de Portadora con detector de colisiones.

FFD.- Full Function Device.

RFD.- Reduced Function Device.

AODV.- Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing.

NS.- Network Simulator.

NAM.- Network Animator.

DSDV.- Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol.

CGSR.- Cluster head Gateway Switch Routing.

WRP.- Wireless Routing Protocol.

OLSR.- Optimized Link State Routing.

TBRPF.- Topology Dissemination Based on Reverse Path Forwarding.

DSR.- Dynamic Source Routing.

MTBF.- Mean Time Between Failures.

MTTR.- Mean Time To Recovery or Mean Time To Repair.

STICS.- Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures Standard.

Broadcast.- Difusión, es un modo de transmisión de información donde un nodo emisor envía información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo.

Latencia.- En redes informáticas de datos se denomina latencia a la suma de retardos temporales dentro de una red.

Multicast.- Multidifusión, es el envío de la información en una red a múltiples destinos simultáneamente, usando la estrategia más eficiente para el envío de los mensajes sobre cada enlace de la red sólo una vez y creando copias cuando los enlaces en los destinos se dividen.

RBS.- Protocolo de sincronización de referencia de transmisión.

TDP.- Protocolo de sincronización de difusión de tiempo.

BS.- Base Station

CBR.- Constant Bit Rate

CCA.- Clear Channel Assessment

CCK.- Complementary Code Keying

CID.- Connection Identifier

CRC.- Cyclic Redundancy Check

CSMA/CA.- Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

CW.- Contention Window

DBPSK.- Diferential Binary Phase Shift Keying

DCD.- Downlink Channel Descriptor

PIRE.- Potencia Isotrópica Radiada Equivalente, (EIRP en inglés)

RTS/CTS.- Request to Send/Clear to Send

SIFS.- Short Inter Frame Space (véase IFS).

SNR.- Signal to Noise Ratio

SS.- Suscriber Station

BER.- Bit Error Ratio

LAN.- Local Area Network

LLC.- Logical Link Control

MPDU.- MAC Protocol Data Unit

PDU.- Protocol Data Unit

PHY.- Physical Layer

TCP.- Transmission Control Protocol

RESUMEN

El presente proyecto contempla efectuar una evaluación y análisis de un prototipo de sensores inalámbricos para la monitorización de infraestructuras críticas de puentes.

La investigación está dividida en dos partes fundamentales, la primera se enfoca en el estudio de las Redes de sensores inalámbricas, dando a conocer varios enfoques técnicos con respecto a su arquitectura, forma de comunicación, topologías disponibles para WSN destacando la topología multi-salto. El diseño de la red de transporte se lo realiza en base a Radio Mobile, la calidad y el comportamiento de la red de sensores inalámbricos se efectúa mediante NS2, utilizando el modelo de propagación TwoRay y una inyección de tráfico CBR y ftp, el aporte es crear un prototipo que trabaje de forma eficiente y ayuden a las evaluaciones estructurales. La segunda etapa consiste en el despliegue de una red de motas sensores en base a lo estudiado en los capítulos anteriores, utilizando el kit de sensores mano-facturados por Crossbow Technology, se puede analizar el comportamiento en un ambiente real.

PALABRAS CLAVES

- MONITOREO DE ESTRUCTURAS
- WIRELESS SENSOR NETWORK
- ZIGBEE
- RADIO MOBILE
- NS2

ABSTRACT

This project aims to make an assessment and analysis of a prototype wireless sensor for monitoring critical infrastructure of bridges.

The research is divided into two main parts, the first focuses on the study of Wireless Sensor Networks, by publicizing several technical approaches to architecture, form of communication, available topologies for WSN highlighting the multi-hop topology. The design of the transport network is performed based on Mobile Radio, quality and performance of the wireless sensor network is via NS2, using the propagation model and an injection TwoRay CBR and FTP traffic, the contribution is create a prototype that works efficiently and help structural assessments. The second stage involves the deployment of a sensor network motes based on the material studied in the previous chapters, using the sensor kit hand-manufactured by Crossbow Technology, you can analyze the behavior in a real environment.

KEYWORDS

- MONITORING OF STRUCTURES
- WIRELESS SENSOR NETWORK
- ZIGBEE
- RADIO MOBILE
- NS2

CAPITULO 1

DIAGNOSTICO DE ESTUDIO

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- ✓ Diseñar un prototipo de una red de telecomunicaciones mediante el uso de sensores inalámbricos para el monitoreo en forma distribuida en el espacio de estructuras de puentes, que puedan recopilar las aceleraciones que estos experimentan, para obtener un reporte básico sobre la estructura.

1.1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Presentar el proyecto a ser desarrollado.
- ✓ Establecer el marco teórico que permita definir los parámetros de diseño de la red de sensores inalámbricos Para el monitoreo de estructuras de puentes.
- ✓ Diseño y Validación de una Arquitectura Basada en WSN para el monitoreo de estructuras de puentes.
- ✓ Estudio de sistemas de comunicaciones que permitan el envío de información en tiempo real.
- ✓ Implementación de un prototipo para el monitoreo de estructuras de puentes y pruebas
- ✓ Conclusiones, recomendaciones.

1.2. Antecedentes del Proyecto

El presente proyecto surge de la necesidad del monitoreo de infraestructuras de puentes desde sitios remotos, facilitando el control y análisis de las vibraciones en la estructura, que por diversos motivos no se los puede realizar constantemente en el lugar. Particularmente existe un gran potencial para esta aplicación en el Ecuador y el resto de los países de América fundamentalmente por el costo de operación a largo plazo y el envejecimiento de estructuras.

La evolución de los sensores ha permitido, dotarlos de una cierta inteligencia propia, permitiendo organizarse a sí mismos y a otros semejantes. Tal organización nos permite desplegar pequeños nodos conocidos como (NS-Network Sensor) para recopilar datos de forma distribuida y así formar una red de información, sin infraestructura física definida, ni limitarse a cables lo cual trae múltiples beneficios. Este concepto se conoce como redes de sensores inalámbricos donde los sensores que conforman la red, miden, almacenan, procesan y envían los datos de las variables medidas, a centros de análisis para que puedan realizar o tomar decisiones dependiendo del caso.

Las redes de sensores inalámbricos controlan y registran las condiciones físicas dentro de un entorno. Estos sistemas permiten monitorear y controlar las vibraciones en los puentes, y en función de ello, tomar acciones de corrección en el momento oportuno, evitando desastres y logrando un seguimiento de la salud de la estructura del puente en condiciones óptimas.

1.3. Justificación e Importancia del proyecto

En la actualidad la inspección manual de puentes tiene un elevado costo, es relativamente poco fiable, y sólo puede llevarse a cabo de forma esporádica. Por otro lado las WSNs (Redes de sensores Inalámbricos), constituyen una tecnología emergente de adquisición de datos que recientemente está creando un gran interés

gracias a sus posibilidades, para la realización de estudios y control de procesos proporcionando una información detallada sobre la infraestructura civil, que normalmente consiste en un gran número de componentes y tiene muchos grados de libertad. Por ejemplo, se puede utilizar 326 canales de sensores en total, y producir alrededor de 65 Mbytes de datos cada hora, teniendo un monitoreo profundo.

Se ha desarrollado una nueva técnica que emplea matrices de bajo costo de redes de sensores inalámbricos para controlar eficazmente la infraestructura civil de un puente. Esta tecnología emplea un procesamiento concurrente y distribuido en tiempo real para superar las limitaciones inherentes a los enfoques tradicionales centralizados. Utilizando las técnicas, los sensores inteligentes con capacidad de comunicación inalámbrica, por lo que la utilización de esta tecnología puede reducir el esfuerzo de instalación en casi dos órdenes de magnitud.

1.4. Alcance del Proyecto

El presente proyecto se enfoca en realizar un estudio de las WSNs (Redes de sensores Inalámbricas), dando a conocer varios enfoques técnicos con respecto al diseño de hardware, arquitectura de sistema, formas de comunicación, topologías disponibles para las WSNs destacando la topología multi-salto basada en clusters, orientado a la monitorización de estructuras de puentes, y también se realizará un análisis de los protocolos de enrutamiento que son los encargados de prolongar el tiempo de vida de la red, obteniendo redes escalables y robustas.

Finalmente con el propósito de validar la investigación propuesta se implementará un prototipo de sensores inalámbricos para monitoreo remoto de un entorno, usando el simulador NS2 se verificará la calidad de la red de los sensores inalámbricos y para la red de transporte se lo realizará en base a Radio Mobile.

1.5. Alcance del Proyecto

La presente proyecto de tesis se estructura en 6 capítulos en los que se presenta el trabajo realizado y se desarrollan las aportaciones antes citadas. En el capítulo 2 se plasma el resultado del estudio a fondo realizado sobre la red de sensores inalámbricos, poniendo de manifiesto sus características, escalabilidad, tolerancia a fallos, tipos de sensores, topologías, métodos de sincronización, protocolos de comunicación, arquitectura del sistema enfocados a la monitorización de estructuras de puentes, lo cual proporciona un conocimiento global de las técnicas más empleadas hasta la actualidad, que cumpla con todos los objetivos propuestos en el punto anterior.

En el capítulo 3 se presenta un diseño y validación de la arquitectura basada en WSN para la monitorización de la infraestructura de puentes. Realizando un enfoque de la planificación, entorno y esquema general de la red, seguido de la fase de experimentación, en la que se introduce el simulador NS-2 con el fin de evaluar las técnicas de la calidad de la red y el estudio de propagación de la red de transporte se lo realizará utilizando el simulador Radio Mobile. Los resultados de este estudio marcarán la orientación en la Implementación de un prototipo y pruebas en el capítulo 5.

El capítulo 4 se realizará un Análisis de los posibles dispositivos y módulos que se podrían utilizar en la implementación de una red de sensores, siendo este capítulo uno de las principales aportaciones del presente trabajo, integrando aspectos de redes de bajo consumo, sistemas operativos compatibles, constituyendo un nuevo paradigma en las WSN.

En el capítulo 5 se presenta la metodología a seguir, en la fase de Implementación de un prototipo de red de sensores inalámbricos para la monitorización de infraestructuras de puentes, los resultados obtenidos nos

ayudaran para verificar el alcance de los módulos, la duración de la red y porcentaje de paquetes perdidos.

Finalmente, en el capítulo 6 presentan las conclusiones, recomendaciones derivadas de la presente tesis, y se exponen los trabajos futuros.

CAPITULO 2

ESTABLECER EL MARCO TEÓRICO QUE PERMITA DEFINIR LOS PARÁMETROS TÉCNICOS PARA REALIZAR LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRITICAS DE PUENTES

2.1 Introducción

La evolución en las redes de sensores ha permitido, entre varias cosas, dotarlos de una cierta inteligencia propia, constituyendo verdaderos sistemas autónomos capaces de auto-configurarse y auto-organizarse entre sí mismos. Tales dispositivos reciben el nombre de sensores inteligentes, y la red que forman constituye lo que denominamos piel digital, capaz de percibir, en todo momento, el estado de un determinado espacio geográfico, lo cual trae múltiples beneficios al desplegar pequeños nodos (NS- Network Sensor) con el fin de recopilar datos de forma distribuida y así formar una red de información, sin infraestructura física, donde los sensores que conforman la red miden, almacenan, procesan y envían los datos o variables medidas.

Una de las aplicaciones que actualmente se está empleando, utilizando redes de sensores, es en la seguridad en infraestructuras, donde se analizan o identifican las posibles amenazas, con el fin de conocer los daños para, prevenirlos, corregirlos y conocer el tiempo de vida útil que posee la estructura, por lo que se

ha desarrollado un área de investigación conocida como Monitorización de Salud Estructural (Structural Health Monitoring o SHM), que busca evaluar las condiciones dinámicas de las estructuras con el fin de determinar, localizar y cuantificar que daños existen en la misma, además de dar una estimación de la vida útil de la estructura (Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural, 2010).

Para el control de la salud de grandes estructuras, se requiere de un sistema de monitoreo, ya que cuantificar las propiedades físicas de manera visual o con métodos acústicos es demasiado complicado. Estos sistemas de monitoreo, trabajan en base a dos tipos de daños, lineal y no lineal. Los lineales son aquellos que sufre una estructura pero que no afectan sus propiedades elásticas, por lo cual las ecuaciones que representan el movimiento de la estructura total pueden seguir siendo utilizadas. En cambio los daños no lineales son los que sus ecuaciones de movimiento cambian por completo, debido a una variación en la respuesta natural de la estructura. Por lo general, el monitoreo de la salud estructural se realiza, tomando en cuenta el daño lineal.

Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, los sistemas de monitorización deben ser operados remotamente y deben poseer un procesamiento de datos, así como una forma sencilla y simple tanto como para la instalación como para su mantenimiento. También deben poseer las técnicas de detección de daños incorporadas, lo mismo que un sistema de alerta en caso de una falla de energía y una base de datos que permita revisar los antecedentes de cualquier falla.

Los agentes inteligentes son algoritmos que pueden proveer un sistema descentralizado, automático y autónomo, con operación remota y a la vez realizar SHM en línea. El reto de esta técnica es decidir adecuadamente sobre variables tales como el tipo de interconexión, orden jerárquico, tipo de agentes para utilizar, la conexión entre los agentes, su función específica, entre otros, de tal manera que

su aplicación resulte efectiva (Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural, 2010) (MARTÍN, 2009).

2.2 Monitorización de estructuras

En la actualidad las estructuras están presentes en el desarrollo de cada sociedad y afectan a aspectos humanos, sociales y económicos. Así que, un buen diseño, calidad, explotación duradera y segura de las estructuras son el objetivo de la ingeniería estructural. Señalando “Durante su vida útil toda estructura debe brindar seguridad frente a fallos y la funcionalidad de servicios previamente establecidos.”

Por lo tanto, un diseño erróneo, una mala construcción y un escaso mantenimiento, sumados a un uso incorrecto y a nuevas variaciones en las condiciones ambientales o un incremento de las cargas, pueden llegar a daños irreversibles como el colapso de la estructura.

En base a la importancia descrita antes, el monitoreo de estructuras ha tenido una gran desarrollo en los últimos años, gracias a la aceptación de sus altas ventajas en estudios estructurales lo que ha llevado a la aparición y desarrollo de nuevas tecnologías (Anna, 2010).

El objetivo del monitoreo en estructuras es mejorar, los conocimientos sobre el comportamiento actual de la estructura y su estado a lo largo del tiempo; realizando estudios de cargas y otros factores que predicen su estado y servicio; también nos ayuda a realizar una estrategia de identificación del daño que puede tener una estructura o sistema estructural (Fort, 2010).

Este es un proceso continuo y autónomo complejo, que incluye todos los aspectos relacionados con la vigilancia mediante fases y una planificación en

detalle de cada uno de sus pasos, lo que conlleva a una interpretación correcta y óptima.

El monitoreo es aplicable tanto en casos de desarrollo de estructuras innovadoras, como en estructuras con problemáticas existentes. En estructuras recién construidas, actualmente se ha hecho una práctica común hacer un monitoreo en lugares que presentan aspectos importantes como, el tipo de material usado, su diseño estructural o tamaño. Por otro lado, están las estructuras con problemas conocidos, las cuales se realiza el monitoreo con el fin de obtener información sobre su resistencia, seguridad y para poder planear su mantenimiento (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

Tiene como objetivo ayudar a mejorar y ampliar la información que existe de la estructura y llegar a realizar una calibración de los modelos numéricos que predicen el comportamiento de la estructura.

En la práctica, este tipo de estudios se lo realiza de forma interactiva, ya que con el avance y desarrollo de nuevas técnicas de estudio se adquiere una mayor información del sistema, permitiendo una mejor valoración sucesiva. La selección del método adecuado es muy importante, la información que se dispone en cuanto a datos técnicos y aspectos cualitativos, así como los objetivos en lo que se refiere al alcance, el grado de detalle y horizonte temporal del estudio, siempre dentro de la capacidad y los medios disponibles para su realización. Estos ensayos que aplican técnicas no destructivas, permiten conseguir la información necesaria de una forma más rápida, y certera sin destruir la estructura.

2.2.1 Control de vibraciones de un puente

Los métodos que se aplican, para el control de vibraciones de puentes involucran varios aspectos, que van desde el tipo de excitación empleada hasta la manera de interpretar los resultados.

El método de excitación aplicada a la vibración de puentes comprende desde las condiciones ambientales, el uso de la infraestructura, hasta elementos específicamente diseñados para la excitación del puente bajo condiciones controladas. Los métodos más utilizados son: los efectos ambientales y de uso, por liberación de cargas, por vibraciones y por impacto. La selección del tipo de excitación depende de la disponibilidad, de los requerimientos de instrumentación y el manejo de información.

El monitoreo de una estructura y su posterior análisis de los resultados, es afectado de forma directa según los elementos que se utilizan para la captura del movimiento de la estructura. En la actualidad los acelerómetros son los que mayor ventaja presentan desde el punto de vista metrológico, siendo superiores a las galgas extensométricas y a los transductores de desplazamiento y velocidad (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

Métodos Empleados para la Excitación de Estructuras

Las técnicas utilizadas para la excitación de vibraciones en puentes son:

- a) Efectos ambientales.
- b) Desplazamiento.
- c) Liberación de cargas.
- d) Vibradores.
- e) Impacto.

- a) Efectos Ambientales

En esta técnica se considera la acción del medio ambiente. También incluye el tráfico vehicular sobre el puente, el viento, el oleaje y los sismos. Dentro de estas variantes la más utilizada es la del tráfico, debido a que la ventaja de esta técnica, es que para la toma de las mediciones no es necesario suspender el servicio del mismo, por otro lado es una técnica de bajo costo, la cual permite

realizar pruebas en condiciones de servicio. La desventaja es que no se conoce la señal de excitación por lo que no puede ser tomada en la etapa de análisis. Además esta señal no constituye un ruido blanco, es decir que su magnitud no es constante en el rango de la frecuencia de interés, por lo que se tendría valores de frecuencia con un peso específico, lo que dificulta en la interpretación de los resultados (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

Otro punto débil de esta técnica como fuente de excitación de vibraciones, es que las características de los vehículos se registran junto con los del puente. Para el caso de puentes cortos, donde los valores de frecuencia de resonancia de los vehículos y el puente son muy cercanos, los registros de la vibración pueden confundirse significativamente, lo que haría que se complique la interpretación de los resultados.

Una comparación entre pruebas de impacto y por tráfico, se reporta que la presencia de vehículos no afecta a las frecuencias naturales de un puente, pero si se ven alterados de manera significativa los valores de amortiguamiento (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

Para el caso de análisis en puentes grandes se utiliza el viento como fuente de excitación de vibraciones, no obstante este método posee las mismas ventajas y desventajas que se manifiestan en el caso que se emplea el método del tráfico.

En general, la excitación ambiental es apropiada para el estudio de puentes medianos y grandes, mismos que son más difíciles de excitar por otros medios. (Anna, 2010)

b) Excitación por Desplazamiento

La técnica por desplazamiento consiste en la aplicación de una fuerza estática al puente (normalmente en el centro), la cual induce un desplazamiento

estático. Posteriormente, la carga se libera de manera instantánea y el puente regresa a su punto de equilibrio, lo mismo pasa con un resorte al aplicar una fuerza que lo estira y luego se libera esta fuerza, oscilando de manera libremente alrededor de su punto de equilibrio.

En campo este procedimiento se lleva a cabo mediante el uso de un dispositivo el cual aplica una fuerza que produce una deflexión en el puente y que, a su vez, permite la liberación de carga de forma instantánea. Esta técnica se la aplica para estudios de laboratorio, en puentes a escala o para el análisis en puentes cortos, la ventaja es que las cargas se las puede aplicar tanto de forma horizontal como vertical, permitiendo realizar modos distintos de vibración. Lo cual hace medir con mayor precisión los coeficientes de amortiguamiento, la principal desventaja que se presenta es que los mecanismos mediante los cuales se produce el desplazamiento resultan ser muy complicados y muy costosos, particularmente para pruebas de campo (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

c) Excitación por Liberación de Cargas

Este método aplica el mismo principio que los métodos de desplazamiento, con la diferencia que la vibración se genera cuando se libera del puente una carga significativa que normalmente cuelga del centro del claro. La diferencia del método por desplazamiento es su bajo costo y se puede aplicar en puentes largos. La desventaja es que solo se la puede aplicar de forma vertical y que no exista riesgo al dejar caer la carga.

d) Excitación por Vibradores

Este método se lo emplea con mayor frecuencia en la actualidad, debido a que hay un control en la señal de excitación: en este caso es posible conocer la magnitud de la fuerza aplicada, que puede ser una señal de excitación predeterminada (senoidal, cuadrada, rectangular), ya sea en una frecuencia fija o

de un barrido de un rango de frecuencias, o también tener una señal aleatoria. Casi en todos los casos los vibradores son dispositivos servo-hidráulicos o electromecánicos, que permiten aplicar una fuerza que varía entre 5 a 90 N (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

En un estudio de caracterización dinámica en un puente se recomienda emplear señales aleatorias o un barrido senoidal, cuando se quiere tener un mayor detalle de una frecuencia natural del puente, se debe utilizar la señal senoidal a dicha frecuencia (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

La ventaja de este método es que es muy factible lo que permite un análisis modal, así como también determinar la respuesta en frecuencia o en función de transferencia, la desventaja de este método es su costo, y el manejo del equipo es complicado. Sobre todo esto para realizar este control es necesario suspender el servicio del puente dentro de un periodo significativo (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

Un caso particular es cuando se emplea un péndulo que cuelga del puente. Este péndulo puede variar tanto su masa como la longitud para poder variar la frecuencia de vibración, permitiendo estudiar las frecuencias naturales del puente de una forma más exacta y muy económica. La utilización de este equipo no permite un análisis de la función de transferencia o un análisis modal completo.

Otro caso es la utilización de vibradores con pulsos de corta duración, para esto se puede aplicar el método del “chasquido” (propuesto por French y Gordon). Define a un chasquido como una señal de excitación armónica variante en el tiempo, la cual, es capaz de excitar los modos de vibración de interés, es muy rápida como para que las amplitudes de cada modo de vibración sea la magnitud adecuada para ser medida una vez se ha detenido. Siendo este un método adecuado para medir los coeficientes de amortiguamiento de estructuras, aún existen algunos aspectos por investigar en cuanto a la forma de la onda de

excitación, ya que se ha encontrado que los factores de escalamiento de cada modo de vibración dependen no solo de dicha función, sino que también del tipo de estructura que se va analizar (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

e) Excitación por Impacto

Por lo general en este método se golpea al puente con una masa proporcional al tamaño de la estructura, y esta masa normalmente forma parte de un martillo de impacto. Para el caso de análisis en puentes cortos esta técnica resulta muy eficiente, ya que el equipo es de bajo costo, fácil de utilizar y portátil. La fuerza de excitación se mide mediante un transductor de fuerza colocado en la punta del martillo, con la desventaja de que no es fácil conocer la masa efectiva del martillo. Para tener una mayor exactitud de esta técnica se utiliza acelerómetros, que colocados sobre el otro extremo de la punta del martillo, mide directamente la aceleración de la excitación.



Figura.1. Martillo de impacto Figura

Para el diseño de un equipo de impacto (por Agardh), incluye pesos, una celda de carga, amortiguadores y una interface. Los amortiguadores son los que absorben la energía de impacto, aumentando con ellos el tiempo de duración del impulso de excitación, la interface debe ser de un material suave para evitar el rebote de la masa, en este equipo se tiene la complicación de controlar de manera precisa el tiempo de duración del pulso t_0 , lo que se quiere obtener es que se exciten las frecuencias importantes del puente, al emplear la siguiente relación (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

$$t_0 \leq \frac{0.44}{f_{\max}} \quad (2.1)$$

Donde f_{\max} es la frecuencia más alta que se debe excitar en Hz.

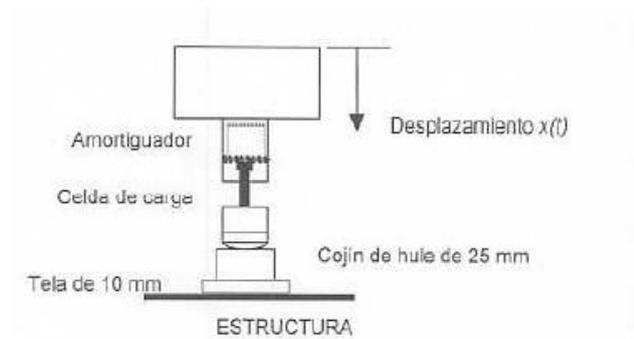


Figura.2. Sistema de impacto

El filtro que se utiliza para medir la respuesta del puente al impacto, debe ser de acuerdo a la duración del impulso, con el fin de evitar la pérdida de información, la frecuencia límite del filtro f_c se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$f_c \geq \frac{1.5}{t_0} \text{ Hz} \quad (2.2)$$

Por lo que esta técnica resulta muy buena para el estudio de análisis de vibraciones en puentes cortos con un análisis modal (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

Transductores para Medición de Vibraciones

Para la medición de la vibración de puentes se ha empleado diferentes tipos de transductores, sin embargo los que han resultado ser más efectivos son los acelerómetros, las galgas extensométricas y los medidores de desplazamiento y velocidad, siendo los primeros los de mayor uso en la actualidad.

a) Acelerómetros

Un acelerómetro mecánico, basa su funcionamiento en la vibración de una masa, y los acelerómetros actuales operan electrónicamente sin incluir ningún dispositivo mecánico. Están formados por un cristal de material piezoeléctrico, el cual al aplicar una fuerza determinada, se produce una diferencia de potencial proporcional a dicha fuerza. Este voltaje es recogido por un amplificador de carga, el cual amplifica esta señal la cual es almacenada para llevar a cabo análisis posteriores (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).



Figura.3. Acelerómetro piezoeléctrico

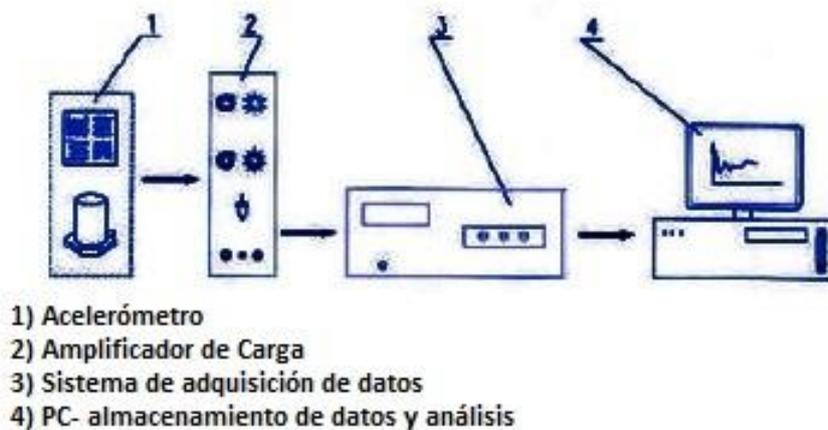


Figura.4. Instrumentación de un Acelerómetro

A diferencia de los acelerómetros mecánicos, los acelerómetros piezoeléctricos no generan resonancia al transductor, pero si presenta una

frecuencia de resonancia eléctrica, que por lo general no afecta a la medición que se lleva a cabo, dado que su valor es muy alto respecto al rango que se utiliza para las mediciones. Estos acelerómetros poseen la característica que son pequeños, sumamente confiables, una alta sensibilidad a frecuencias entre 0.01 y 20 Hz, y su rango de aceleración que debe cumplir es de $\pm 1.0g$ ($1g=9.8\frac{m}{seg^2}$).

Una de las ventajas al utilizar estos equipos es que se los puede utilizar en diferentes posiciones, con lo que se puede medir las vibraciones en cualquier de las tres direcciones de oscilación que pueda presentarse en la estructura (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

b) Galgas Extensométricas

Son equipos los cuales miden micro-deformaciones puntuales del elemento estructural donde se instala, son evaluaciones particularmente localizadas y no necesariamente reflejan el comportamiento global del elemento o de la estructura.

Las galgas que más se utilizan para la medición de deformaciones son las de tipo resistivo, este tipo de galgas tienen el inconveniente de que la instalación es compleja. Estos instrumentos, a partir de la medición de las deformaciones se infieren los esfuerzos dinámicos, se tiene que realizar un análisis previo para la selección de los puntos, en los cuales las mediciones puedan ser utilizadas para un análisis modal o para una evaluación del comportamiento vibratorio de la estructura (Instituto Mexicano de Transporte, 1999) (Sherif El-Tawil, Ph.D., P.E., F.ASCE, University of Michigan, 1990).

c) Transductores de Desplazamiento

En el estudio de las vibraciones de los puentes, una buena opción es medir los desplazamientos dinámicos de sus estructuras, utilizando para ellos transductores de desplazamiento de alta precisión, el inconveniente de estos equipos es que requieren de una plataforma inercial, la cual es difícil o imposible

de instalar. Una variante de esta técnica es la utilización de transductores láser, los cuales permiten que la instalación de la plataforma inercial sea en los puntos accesibles y lejos del puente.

d) Transductores de Velocidad

Son equipos que permiten realizar el estudio de vibraciones dinámicas, midiendo para ellos la velocidad de desplazamiento en el punto instalado, normalmente, estos instrumentos tienen rangos de respuesta a bajas frecuencias, por lo que resultan ser muy efectivos en el estudio de vibraciones en puentes, es importante mencionar que este tipo de sensores están diseñados para trabajar mediante algún sistema mecánico de resorte, por lo que las frecuencias del transductor deben ser tomadas en cuenta en la medición, con el objeto de evitar errores en la medición.

PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS

Para que un determinado procedimiento de prueba asociado al estudio de puentes pueda ser considerado como válido. A continuación se describen algunas de las condiciones que se deben tomar en cuenta. Estos no son aplicables para excitaciones ambientales, pero si para las que son por desplazamiento, liberación de cargas, impacto o mediante vibradores.

Para que un estudio de vibraciones en un puente sea calificado como exitoso, debe incluir mediciones a varias frecuencias, y se debe verificar la respuesta del puente en un rango amplio, los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta son:

i. Linealidad

Es importante conocer en el puente que se está estudiando el comportamiento de la respuesta con respecto a la amplitud de excitación y determinar el grado de proporcionalidad que se tiene, esto demuestra que el coeficiente de amortiguamiento varía con respecto a la amplitud de impacto ejercida en diferentes puentes.

ii. Repetibilidad

Para cada condición de excitación del puente y combinaciones de mediciones, debe realizarse varias pruebas las cuales permitan verificar el grado de repetibilidad que la prueba tiene, de lo contrario, la interpretación de los resultados podría ser errónea.

iii. Reciprocidad

Es una condición que se debe cumplir si se puede verificar a través del análisis de las funciones de transferencia entre los dos puntos A y B, primero excitando en el punto A y realizando la medición en el punto B, y viceversa, el resultado de las funciones de transferencia debe ser el mismo.

iv. Sensibilidad a los Cambios en las Condiciones de Prueba

Al diseñar un procedimiento de pruebas se debe buscar que no exista ningún cambio en las condiciones ambientales las cuales afecten sensiblemente el comportamiento dinámico del puente. Por lo que es necesario, evaluar qué factores pueden variar y determinar si las variaciones afectan los resultados, en los casos en los cuales existan variaciones que afecten a las mediciones estas se deben incluir en los análisis.

v. Número de Puntos a Instrumentar

Para un análisis modal en puentes, en el que la respuesta dinámica de determinados modos de oscilación es establecida, es necesario tener un conjunto de puntos establecidos sobre el puente, en los cuales se mida la respuesta de los puentes ante la aplicación de una fuerza de excitación, mismas que son aplicadas a un subconjunto de dichos puntos identificados. Para determinar el número de puntos que se implantar (N), para medir el n -ésimo modo de vibración, se utiliza la siguiente relación.

$$N \geq 2n - 1 \quad (2.3)$$

Por lo que, si se quiere medir hasta el cuarto modo de vibración longitudinal de un puente se requiere de siete puntos distribuidos a lo largo del mismo. Lo mismo ocurre si se quiere medir el tercer modo de vibración transversal, esto quiere decir que se necesitan de cinco puntos distribuidos a lo ancho del puente. Ahora, si se quiere medir tanto el modo de vibración longitudinal con el modo transversal, en este caso se requiere trazar una malla sobre el puente de 5×7 para implementar 35 puntos necesarios (Instituto Mexicano de Transporte, 1999).

Si bien el tener mayor puntos instrumentados permite obtener mayor información sobre el comportamiento dinámico del puente, se debe tener en cuenta el costo que es casi proporcional al incremento de los puntos instrumentados, y también que el proceso de análisis de la información también se complica (Instituto Mexicano de Transporte, 1999) (Sherif El-Tawil, Ph.D., P.E., F.ASCE, University of Michigan, 1990).

2.2.2 Monitorización de la salud de una infraestructura civil “puentes”

El monitoreo de salud estructural SHM, (Structural Health Monitoring) es una nueva tecnología la cual combina la captura de datos de la estructura con el

análisis de la misma. Estos datos son obtenidos desde equipos instalados en la estructura del puente, gracias al avance tecnológico en la actualidad se utiliza una red sensorial no destructiva, desde la cual se obtienen indicadores que permiten detectar anomalías (daños o degradación) en la estructura del puente. Esta información puede ser periódica o en tiempo real y continua, y está ligada a las diferentes variaciones que se pueden presentar como deterioro, corrosión, fatiga, reacciones químicas, humedad, y cambios en las variables del ambiente, así como las propiedades físicas relativas a la carga, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones, dislocaciones y otros factores que son necesarios para obtener una evaluación del estado de la estructura. Dicha evaluación exige un análisis de la situación actual de la estructura para obtener un perfil de la salud de la misma, es un estudio que se lo realiza a la estructura en base a la información captada por los sensores (Anna, 2010).

En el monitoreo de salud de una infraestructura de puentes se denotan las siguientes etapas, las mismas que variarán dependiendo de la estructura.

Razones y variables para la evaluación operacional

La importancia de la estructura así como los diferentes factores a las que está sometida, justifican que se establezca el monitoreo de salud estructural (por razones económicas, estratégicas, de seguridad u otras).

La selección de variables a obtener y el estudio que se realizara a la infraestructura, es conocer los posibles daños que puede presentarse en la estructura (tomando en cuenta la importancia de los mismos), así como las condiciones operativas o ambientales que podrían determinarlos.

Por otro parte se tiene que considerar, la posibilidad y limitaciones tanto para medir como para monitorear las variables seleccionadas. También hay que

tener en cuenta las facilidades tecnológicas y las necesidades de frecuencia que se requiere realizar la medición (Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural, 2010).

Adquisición y gestión de datos

En esta sección analiza el mejor método de activación o estímulo, el tipo de sensores apropiados (basados en su capacidad y técnicas de adhesión o embutido), así como su número y colocación espacial. Hay que tomar en cuenta el hardware apropiado para la adquisición, almacenamiento y transmisión de los datos, así como el tiempo de periodicidad de estas tareas.

En esta etapa se requiere la normalización de los datos. Esto es, llegar a diferenciar las diversas mediciones y de donde provienen, un ejemplo, en las diferentes condiciones ambientales que se pueden presentar, no todos los casos serían directamente comparables. La base de normalización está en averiguar las causas de variabilidad de la información, y en el caso del monitoreo, es separar aquellas variables propias que influyen en el daño y que son las que se estudiarán de otras calificables de ruidos para el sensor. Estos ruidos son evitables o controlables (o estadísticamente cuantificables), de aquellos no predecibles (Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural, 2010).

Una limpieza de datos es recomendable. Los filtros son técnicas que ayudan a determinar los datos que serán transmitidos, desde las visitas y formas para comprobar que algún sensor esté o no funcionando bien, a la aplicación de técnicas de procesamiento de señales.

Identificación de antes y después del daño

Debe estar claro si el dato que se transmite corresponde a la estructura sana o dañada. Los rasgos del dato que lo caracterizan en una u otra situación. Ello es variable dependiendo de la estructura y de la sollicitación. Por ejemplo, para el análisis dinámico serán verificables las variaciones en la amplitud y en la frecuencia. Otros serán los casos relacionados con la fractura o la temperatura.

En la gestión de datos es importante considerar la compresión de los mismos. Esta es una técnica recomendable para el caso de muchas variables o datos por periodos largos.

Finalmente en esta etapa se considerará la calidad de los datos, pudiendo utilizarse pruebas de significancia estadística.

Cuantificación del daño

El sistema de monitoreo debe dar lugar a una información cuantificada de la magnitud del daño. Se trata de uno o más algoritmos que incluso pueden estar asociados a sistemas de aprendizaje para conocer mejor si la estructura está dañada o no (Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural, 2010).

Modelos estructurales

En la literatura se establece como parte del sistema de monitoreo. Se trata de modelos de análisis que utilizan la información básica de la estructura (geométrica y constitutiva) con las condiciones provenientes del sistema sensorial. Los modelos más comunes emplean técnicas de elementos finitos.

Los resultados se contrastan con un patrón de estructura sana. Es el equivalente a realizar un diagnóstico de la estructura (Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural, 2010).

Predicción

El monitoreo de salud estructural tiene el propósito preventivo de establecer si la estructura habrá de dañarse, para tomar las medidas correctivas oportunas. De ahí que la información histórica que registre, debe servir también para establecer parámetros de conformidad y tendencias, que faciliten un sistema de alerta.

Acción

Si el monitoreo funciona bien, adquiere sentido la expresión: hacer el mantenimiento cuando se le necesita. De esta manera, el sistema de salud estructural puede ser concebido como el sistema nervioso de la estructura, a través del cual, ésta siente y transmite información a un cerebro capaz de analizarla, conservarla y reaccionar apropiadamente (Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural, 2010).

2.3 Redes de sensores Inalámbricos.

En las últimas décadas, habido un gran desarrollo de las redes de información, básicamente las que han tenido un gran desarrollo son las comunicaciones inalámbricas, gracias a los continuos avances tecnológicos. Lo que ha llevado a la aparición de nuevos circuitos electrónicos embebidos, potentes, de menor costo, permitiendo también, importantes avances en el diseño de los transductores. Todo esto permite obtener nuevos dispositivos que permiten la medida y detección de cualquier magnitud física de forma sencilla y con gran precisión, con la ventaja que estos dispositivos poseen un tamaño pequeño y bajo costo (Fernández, 2010) (Sosa, 2011).

Esto ha hecho que se convierta en un área de interés para la investigación de las Redes Inalámbricas de Sensores, conocidas en inglés como Wireless Sensor Networks (WSN), este tipo de tecnología promete ser un gran avance según diversos analistas tecnológicos y revistas especializadas. La posibilidad de realizar un despliegue de dispositivos de bajo costo y una larga duración sin requerir a un mantenimiento, y que sean capaces de obtener información de su entorno y reenviarla de forma inalámbrica y segura a un centro de coordinación, desglosa una serie de aplicaciones. Las WSN tienen un gran éxito en aplicaciones industriales, sistemas de automoción, entornos inteligentes, identificación de productos, domótica-seguridad, control de consumo energético, estudio de invernaderos, monitorización de estructuras, y un sin fin de nuevas aplicaciones.

La ventaja principal de estos nuevos dispositivos es de sustituir sensores de elevada complejidad y limitados en números por su alto costo, en una infraestructura de comunicaciones autónoma sencilla, que resulta considerablemente más barato, estos sensores, son capaces de obtener magnitudes físicas del entorno, además de esto pueden dar soporte a las comunicaciones de otros nodos como elementos de infraestructura.

La característica más relevante de la red de sensores inalámbricos, es su capacidad de auto-organización, lo que permite realizar un despliegue fácil y rápido de la red de sensores en lugares de difícil acceso, o incluso en el interior de zonas afectadas por catástrofes. Gracias a esta característica se puede asegurar que la red se va a mantener siempre en funcionamiento a pesar que algunos nodos se encuentren fuera de servicio, debido a fallos, agotamiento baterías, modo bajo consumo, etc. En estos casos la red es capaz de reorganizarse y continuar funcionando (Fernández, 2010).

Las WSN cubren un área relativamente pequeña. De esta forma se consigue economizar de forma significativa el consumo de potencia, por otro lado, se tiene que implementar mecanismos de enrutamiento con múltiples saltos, esto va a permitir que exista comunicación con nodos más alejados. Otra ventaja es la

reutilización de frecuencias, ya que dos nodos con áreas de cobertura disjuntas podrán emplear la misma banda de transmisión. Si el número de nodos es lo suficientemente grande, este mecanismo permite establecer múltiples rutas para cada destino, permitiendo la implementación de técnicas de tolerancia a fallos por lo que existen rutas redundantes, también poseen gestión global de energía, con esta técnica sirve para balancear el consumo entre nodos (M.Senthamilselvi and Dr.N.Devarajan, 2008) (Hernandez, 2010).

2.3.1 Tolerancia a fallos

El funcionamiento de una red de sensores inalámbricos se la considera impredecible, ya que generalmente se producen fallas en la red. Este mal funcionamiento que se genera en la red produce zonas ciegas dentro de la WSN, debido al aislamiento de un cierto número de sensores. Provocando q exista un comportamiento anormal de la red, y pueden hasta llegar a situaciones extremas del colapso total de redes.

Se tiene que considerar que los dispositivos de sensores pueden fallar, debido a, que pueden ser robados, dañarse, o simplemente se agota la batería. Lo anterior afecta directamente al rendimiento de la red de sensores inalámbricos. El trabajo al querer remplazar las baterías, ó de sustituir algún equipo que este dañado, suele ser visto como una tarea complicada en redes extensas, o cuando la geografía de la zona de instalación es complicada. Una WSN debe ser tolerante a fallas, y así asegura el funcionamiento de las tareas asignadas a la misma (Farinaz Koushanfar, Miodrag Potkonjak, Alberto Sangiovanni- Vicentelli, 2008).

La tolerancia a fallas se la puede definir como la capacidad de garantizar un óptimo funcionamiento de la red, es decir que no existan intervalos vagos, a pesar de que exista un mal funcionamiento de algunos nodos. La confiabilidad $R(t)$ ó también llamada tolerancia a fallas, puede ser modelada utilizando la distribución

de Poisson, representando la probabilidad de no fallar en un intervalo de tiempo $[0,t]$ (Hoblos, G, Staroswiecki, My Aitouche, A., 2000),

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

Donde λ y t son la tasa de falla del sensor en un período de tiempo considerado respectivamente. Como resultado de esto, el nivel de la tolerancia a fallas de una WSN dependerá del tipo de aplicación, y de todos los posibles esquemas de fallos que se planteen para una correcta implementación.

Se puede considerar la tolerancia a fallos en cuatro niveles diferentes de abstracción, a partir del hardware y software del sistema e ir al middleware y las capas de aplicación (Hoblos, G, Staroswiecki, My Aitouche, A., 2000). En algunos estudios, se considera la tolerancia a fallas en cada uno de los componentes individuales de un nodo. Por último se puede considerar la tolerancia a fallos de cada nodo a nivel de red.

2.3.2 Escalabilidad

La cantidad de sensores desplegados para estudiar un fenómeno puede ser en el orden de cientos o miles, dependiendo del tipo de aplicación, la característica del entorno u otros factores que pueden influir en la cantidad de sensores que se pueda necesitar, el número de sensores pueden llegar alcanzar valores superiores. Estos diseños deben ser capaces de trabajar con este alto número de nodos y ser capaces de utilizar la alta densidad presente en las redes de sensores (Fernández, 2010).

La densidad

$$\mu(R) = \frac{N \cdot \pi R^2}{A} \quad (2.5)$$

Donde N es el número de sensores dispersos en una región A y R es el radio de transmisión. Lo que quiere decir la expresión, (R) proporciona el número de nodos dentro del radio de transmisión de cada nodo en la región A .

2.3.3 Tipos de sensores

Existe una gran variedad de sensores dependiendo de los principios físicos en los que se basan. En la actualidad para medir cualquier variable física tenemos diversos tipos de sensores, con sus ventajas y desventajas. Debido al gran número de sensores se deben clasificar de acuerdo con algún criterio. Entre estos tenemos:

Según el aporte de energía, los sensores se pueden dividir en moduladores y generadores. Los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar. La entrada solo controla la salida. En los sensores generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada.

Según la señal de salida, los sensores se clasifican en analógicos o digitales. Los analógicos la salida varía, a nivel macroscópico, de forma continua. La información está en la amplitud, si bien se suelen incluir en este grupo los sensores con salida en el dominio temporal. Por otro lado los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. No requieren conversión A/D, y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud, pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés (José, 2009).

Dependiendo al modo de funcionamiento, los sensores pueden clasificarse de fuga o de comparación. Los sensores que funcionan por fuga, la magnitud medida produce algún efecto físico, que genera algún efecto similar, pero opuesto, en alguna parte del instrumento, y que está relacionado con alguna variable útil.

Los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la fuga mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. Existe un detector de inestabilidad y un medio para poder restablecerlo (José, 2009).

Según el tipo de relación entrada-salida, los sensores pueden ser de orden cero, de primer orden, de segundo orden o de orden superior. El orden está relacionado con el número de elementos almacenadores de energía independientes que incluye el sensor, y repercute en su exactitud y la velocidad de respuesta. Esta clasificación es de gran importancia cuando el sensor forma parte de un sistema de control en lazo cerrado.

Los sensores se pueden clasificar según la aplicación. Entre estos tenemos, sensores de temperatura, de presión, caudal, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, y otros más. Pero, esta clasificación difícilmente puede ser absoluta ya que la cantidad de magnitudes que se las puede medir con los sensores es prácticamente inagotable (José, 2009).

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, es más atractiva la clasificación de los sensores de acuerdo con el parámetro variable: resistencia, capacitancia, inductancia, añadiendo luego los sensores generadores de tensión, carga o corriente, y otros tipos no incluidos en los anteriores grupos. En la siguiente Tabla.1, se muestran algunos sensores y sus métodos de detección comunes para las magnitudes más frecuentes.

Tabla.1. Tipos de sensores según su magnitud física. Fuente: Tomada de referencia (José, 2009).

SENSORES	POSICION DISTANCIA DESPLAZAMIENTO	VELOCIDAD	ACELERACION VIBRACION	TEMPERATURA	PRESION	CAUDAL FLUJO	NIVEL	FUERZA	HUMEDAD
Resistivos	Potenciómetros Galgas Magnetoresistencias		Galgas	RTD Termistores NTC,PTC	Potenciómetros	Galgas Termistores	Potenciómetros Termistores LDR	Galgas	Humistor
Capacitivos	Capacitor Diferencial				Capacitor variable Diafragma		Capacitor variable	Galgas capacitivas	Capacitor Variable
Inductivos y electromagnéticos	LVDT Resolvers Efecto Hall	LVDT Efecto Hall	LVDT		LVDT Reluctancia variable	LVDT	LVDT	Magneto-eléctrico LVDT	
Generadores			Piezoeléctricos	Termopares Piro eléctricos	Piezoeléctricos			Piezoeléctricos	
Digitales	Codificadores incrementales y absolutos	Codificadores incrementales		Osciladores de cuarzo		Vórtices			SAW
Uniones p-n	Fotoeléctricos			Diodo Transistor			Fotoeléctricos		
Ultrasonidos	Reflexión	Efecto Doppler				Efecto Doppler	Reflexión Absorción		

Existe otro tipo de clasificación de sensores (desde el punto de vista de la ingeniería electrónica):

Sensores resistivos, que se clasifican en.

- ✓ Sensores potenciométricos.
- ✓ Sensores de temperatura de resistencia metálica (RTD).
- ✓ Galgas extensiométricos.
- ✓ Termistores (NTC y PTC).
- ✓ LDR.
- ✓ Sensores de gases de óxidos metálicos semiconductores.
- ✓ Magnetorresistencias.
- ✓ Higrómetros resistivos.

Sensores capacitivos, que se dividen por.

- ✓ Capacitor (variación de alguno de sus parámetros: área de las placas, separación entre ellas, dieléctrico).
- ✓ Capacitor diferencial.
- ✓ Sensores capacitivos en silicio.

Sensores inductivos, y su clasificación.

- ✓ Sensores inductivos básicos.
- ✓ El transformador diferencial lineal (LVDT).
- ✓ Otros sensores inductivos.

Sensores electromagnéticos, que se dividen en cuatro grupos.

- ✓ Sensores electromagnéticos lineales.
- ✓ Sensores electromagnéticos rotativos.
- ✓ Sensores electromagnéticos rotativos de velocidad angular.
- ✓ Sensores electromagnéticos rotativos de posición angular.

Sensores piezoeléctricos.

- ✓ Materiales piezoeléctricos como sensores de presión, fuerza y aceleración.

Sensores de ultrasonidos.

Sensores piroeléctricos.

Sensores optoelectrónicos generadores de señal.

- ✓ Fotodiodos.
- ✓ Fototransistores.
- ✓ LEDs.
- ✓ Dispositivos de acoplamiento de carga (CCDs).
- ✓ Fotomultiplicadores.

Sensores de efecto Hall.

Termopares.

Otros tipos de sensores.

- ✓ Sensores de fibra óptica.
- ✓ Biosensores.
- ✓ Sensores de Ion selectivo.
- ✓ Entre otros (los de más reciente generación).

Sensores capacitivos.

Su funcionamiento se basa en la variación de la capacidad entre dos o más conductores entre los que se encuentran un dieléctrico, en respuesta a la variación de alguna magnitud física. Aunque las aplicaciones más conocidas están asociadas con medida de movimiento lineal y angular, los sensores capacitivos se emplean también para la medida de humedad, presión, nivel, aceleración, entre otros.

Entre las principales características que presentan son:

- ✓ Son capaces de detectar pequeños desplazamientos (hasta 10-10 mm).
- ✓ Son dispositivos que son fácilmente integrables en un “chip” de silicio.
- ✓ El funcionamiento no se ven afectados por la temperatura o el alineamiento mecánico.
- ✓ Son muy estables en entornos hostiles.
- ✓ Tienen un bajo consumo.

Sin embargo, a pesar de estas y otras importantes ventajas que poseen estos sensores, la implementación de estos es muy limitadas debido a factores como, que para su funcionamiento requieren de circuitos adicionales, ya que son sensores no lineales, necesitan de circuitos de acondicionamiento, no operan en ambientes con humedad extrema.

La tecnología de fabricación de circuitos integrados en silicio está siendo empleada de forma masiva en el desarrollo de sensores (microsensores de silicio). La integración en silicio permite sustanciales ventajas: mayor sensibilidad, reducción de peso, ahorro de peso, ahorro en los costes de fabricación, mayor número de aplicaciones, entre otras. Adicionalmente se tienen ventajas como: reducción de los problemas derivados de la temperatura, humedad, capacidades parásitas y de los terminales, además de proporcionar alta impedancia de entrada.

Criterios para la selección de sensores.

Para la selección de un dispositivo sensor, que sea acorde con una aplicación específica y que tenga un buen desempeño, se deben tomar en cuenta varios factores (ambiente, económicos, u otros), y se tiene que tomar énfasis en

las características propias de los sensores. La Tabla.2, nos indica las características propias de los transductores y sensores.

Tabla. 2. Características de los transductores y sensores.

Exactitud	Precisión	Velocidad de respuesta
Rango de funcionamiento	Calibración	Fiabilidad

2.3.4 Topologías de WSN

En una red de sensores inalámbricos lo que se busca es la mejor ubicación entre nodos para el envío y recepción de información. Estas agrupaciones se denominan topología de la red. Cada una de estas agrupaciones posee un nodo coordinador y un número de nodos miembros, dando lugar a topologías jerárquicas.

En este tipo de redes para la transmisión de datos se utiliza topología lógica Token. En la que el nodo coordinador es el que administra la red y se encarga de pedir información a cada nodo sensor, este proceso se efectúa por el nodo coordinador preguntando a cada NS (uno por uno) mediante un código que es muy similar al Token, lo que hace que su transmisión sea muy eficiente, esto hace que para la lógica utilice el tipo Token.

Por otra parte la topología física está ligada principalmente a los módulos de comunicación que se utilicen para el desarrollo del proyecto, debido a ciertas limitaciones lo más aconsejable es utilizar una topología física en estrella, en estrella extendida y en árbol, esto depende que tanto de la superficie se cubrir por la red (José, 2009).

✓ Estrella:

Esta topología el área de cobertura es amplia, la ventaja de ésta es que si falla uno de los nodos sensores la red aún funciona. Pero su principal desventaja es que si por alguna razón falla el nodo coordinador, se cae por completo la red y no se obtendría ninguna información en el nivel de control. La Figura.5, denota la distribución de forma general de los nodos sensores y del nodo coordinador.

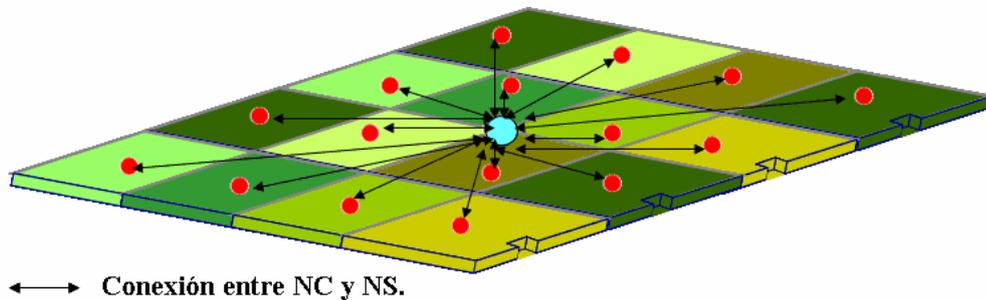


Figura. 5. Distribución de los elementos de la WSN con topología en estrella con fuente propia.

✓ Estrella extendida:

La superficie de cobertura en esta topología es mayor que la de estrella, la red está formada por varias estrellas entre dos a cuatro como las vistas en el tipo de topología anterior. La ventaja de esta es, que si deja de funcionar uno de los nodos sensores la red aún trabaja, y si falla uno de los nodos coordinadores la red aún se mantiene en funcionamiento excepto la topología de estrella que tiene el NC caído. Su desventaja es que si por alguna razón falla el desempeño del NC que administra a los demás nodos coordinadores, se cae en su totalidad la red y no llegaría información al nivel de control. La Figura.6, se puede apreciar de forma gráfica como sería la distribución de las estrellas y del nodo coordinador general.

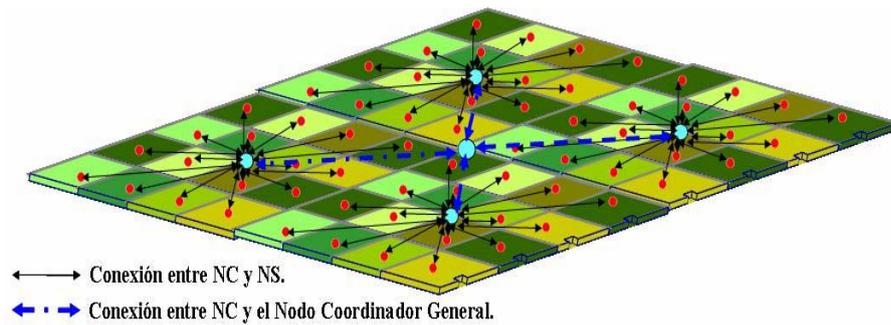


Figura. 6. Distribución de los elementos de la WSN con topología en estrella extendida (mayor cobertura).

✓ **Estrella extendida combinada con árbol:**

La superficie de cobertura de esta topología es mayor a las anteriores, la red está integrada por varias estrellas extendidas, y varios nodos sub-coordinadores y un nodo coordinador general, con cierta jerarquía entre estos nodos, por lo que existe una combinación entre la topología anterior y una jerárquica o árbol. Su desventaja es que si por alguna razón falla el nodo general que administra a los demás nodos coordinadores, deja de funcionar toda la red y no se recibirá ninguna información en el nivel de control, por el contrario si falla un nodo sub-coordinador solo se cae la parte de la red correspondiente a este nodo, y afectaría al resto de la red dependiendo de la jerarquía que posea el nodo sub-coordinador. La Figura.7, nos muestra la distribución de las estrellas extendidas, los sub-nodos coordinadores y el nodo coordinador general (el de mayor jerarquía en la WSN).

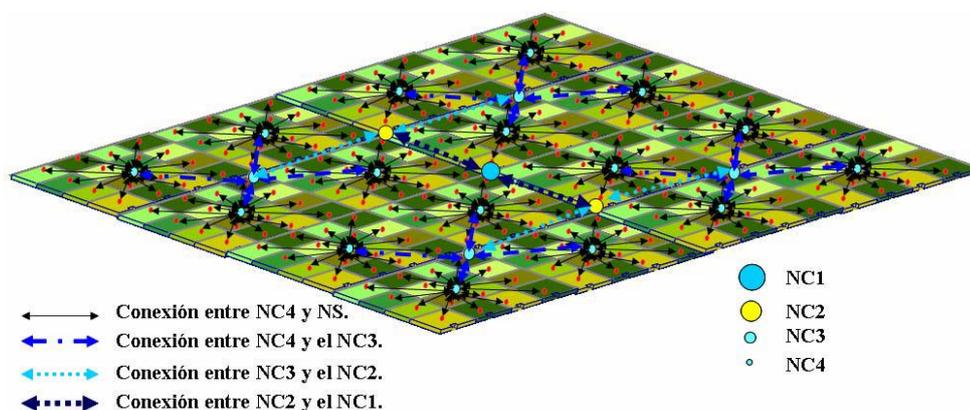


Figura. 7. Combinación de la topología en estrella extendida con la topología en árbol para una WSN.

Las topologías anteriores serán seleccionadas según el módulo de radio utilizado, ya que dependerán del alcance, potencia de transmisión, y principalmente el protocolo de comunicación.

2.3.5 Métodos de Sincronización

El protocolo Timing-Sync que trabaja en redes de sensores funciona en dos fases: En el primer nivel es el encargado del descubrimiento en toda la red y la segunda es la sincronización. En la primera fase el protocolo crea una topología jerárquica en la red, al que cada nodo se le asigna un nivel. Solo a un nodo se le asigna el nivel 0 que también se lo conoce como Nodo Coordinador. En la segunda fase, un nodo de nivel "x" se sincroniza con un nodo del nivel "x-1". Al final de la fase de sincronización, todos los nodos se encuentran sincronizados al Nodo Coordinador, de esta forma es como se procede en la sincronización en toda la red.

Fase de Descubrimiento.

Esta fase se ejecuta una vez que ya está realizado el despliegue de toda red. Primero se determina un nodo como Nodo Raíz, el cual deberá tener un receptor GPS y el algoritmo sincronizará todos los nodos en un tiempo externo.

Si el Nodo coordinador no posee un GPS, los nodos de sensores pueden periódicamente funcionar como el Nodo Coordinador. A este nodo se le asigna el nivel '0' e inicia la fase de Nivel de Descubrimiento emitiendo un paquete de datos de nivel de descubrimiento. El paquete contiene la identidad y el nivel del nodo emisor. Una vez recibido este paquete el nodo vecino del Nodo Coordinador se asigna el nivel '1' y así sucesivamente hasta que todos los nodos de la red tengan un nivel (Martell, 2011).

Fase de Sincronización.

Fundamentalmente se construye con dos vías de intercambio de mensajes entre un par de nodos. La diferencia que existe entre los dos nodos es aparentemente constante, en el pequeño periodo de tiempo durante se intercambia un solo mensaje, y el retardo de la propagación también se la asume como constante en ambas direcciones (Martell, 2011).

2.3.6 Protocolos de comunicación

Se encargan de generar un código básico de envío/recepción de información. Crea el lenguaje a través del cual los dispositivos se conectan a la red de comunicación.

✓ Protocolo Routing.

Se encarga de generar las vías para comunicar los dispositivos que se encuentran distribuidos en la red. Los nodos no tienen un conocimiento de la topología de la red, así conocerán cuántos son, qué cantidad están al alcance de cada uno y cómo podrá enrutarse con ellos o servir de comunicador entre nodos. Después de un tiempo cada nodo conocerá su situación. Los protocolos se dividen en; Routing plano, jerárquico o adaptativo. En el ruteo plano a todos los nodos se les asigna la misma función. En el ruteo jerárquico los nodos pueden tomar diferentes funciones según se necesite. En el ruteo adaptativo se controlan ciertos parámetros para que se puedan adaptar a la situación de la red y a las condiciones de energía (Martell, 2011).

✓ **Protocolo de Transporte.**

Se encarga de facilitar el tránsito de información de un nodo a otro, entre sensores y la estación base o entre los demás dispositivos activos en la red. Los protocolos de transporte se utilizan para mitigar la congestión y reducir la pérdida por empaquetamiento de datos, proporcionar equidad en la asignación de ancho de banda y garantizar la fiabilidad de extremo a extremo en la red (Martell, 2011).

2.4 Arquitectura del sistema.

Las redes de sensores están formadas por un conjunto de pequeños dispositivos denominados nodos sensores, estos dispositivos tienen una capacidad limitada de procesamiento, almacenamiento y comunicación, cuyo tiempo de vida de estos, está ligado a la batería que posee el dispositivo. El tiempo de vida de la red de sensores dependerá por tanto del tiempo de vida de la batería de sus nodos. Normalmente estos dispositivos son desplegados de manera ad-hoc en una determinada área que se va a monitorizar. En redes de comunicación, dicho enunciado hace referencia a una red en la que no hay una jerarquía, es decir un nodo central, sino que todos los nodos se encuentran en igualdad de condiciones (Inregrantes deñ grupo de investigacion EDMANS, 2009).

Este modelo nos permite, realizar una serie de mediciones, transformar la información en una señal digital en el propio nodo y transmitirla fuera de la red de sensores, utilizando un dispositivo de enlace “gateway”, a una estación base, donde la información será almacenada para terminar finalmente en un servidor con una mayor capacidad la cual le permita construir una base de datos, y realizar un análisis de los datos recibidos.

Por lo que una red de sensores inalámbricos típica, está conformada como muestra la Figura.8:

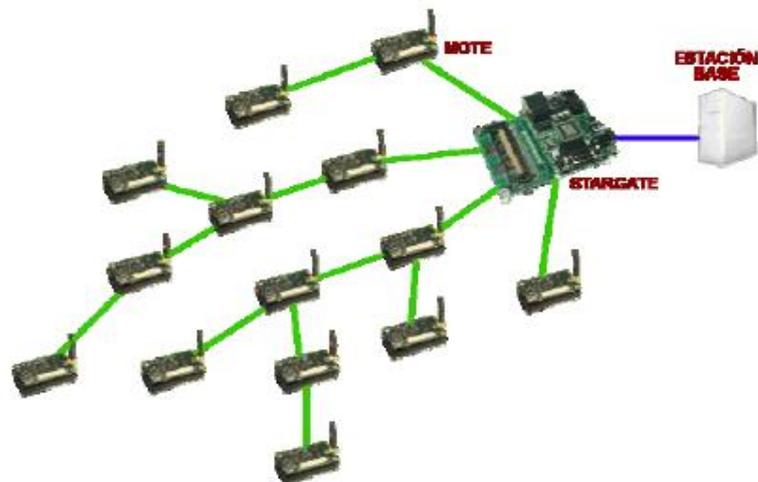


Figura. 8. Red inalámbrica de sensores.

2.4.1 Nodo Inalámbrico

Los nodos inalámbricos se denominan motas, del inglés ‘mote’, se caracterizan por tener peso ligero, y un tamaño pequeño. Son dispositivos electrónicos capaces de adquirir la información proveniente del entorno que los rodea, procesarla y transmitirla de forma inalámbrica hacia la estación base.

Lo fundamental de estos dispositivos, es que cuentan con un tamaño pequeño, además de tener un consumo de energía bajo y que su costo sea reducido. Por otro lado, debe tener un potente sistema de ejecución de programas, una transmisión de datos eficiente y una amplia área de cobertura.

Las motas son dispositivos diseñados y programados para trabajar de forma conjunta dentro de la red, es decir si una mota se encuentra aislada de las demás esta no tendrá ninguna utilidad (Inregrantes deñ grupo de investigacion EDMANS, 2009).

La Figura.9, nos muestra el hardware que posee una mota, indicando sus partes bien diferenciadas.



Figura. 9. Arquitectura de un nodo inalámbrico.

Procesador

Es el encargado de interpretar y procesar los datos para luego ser transmitirlos, esta unidad posee otras funciones como el de gestionar el almacenamiento de datos en la memoria.

La función básica de un nodo sensor es la comunicación y la recolección de datos mediante un sensor, este dispositivo debe contener una unidad de procesamiento, que se encargue de gestionar todas estas operaciones. Existen diferentes componentes disponibles en el mercado que pueden ser integrados en un nodo, como micro-controladores, microprocesadores y FPGA (Inregantes deñ grupo de investigacion EDMANS, 2009).

FPGA: Actualmente éstas presentan varias desventajas, su principal de ellas es el consumo. A pesar de que en el mercado podemos encontrar FPGAs de bajo consumo, este consumo no es lo suficientemente bajo como debería ser para este tipo de dispositivos.

Microprocesadores: Actualmente son remplazados por los microcontroladores, ya que éstos integran dentro de un mismo dispositivo, un microprocesador y memoria.

Microcontroladores: A parte de estar compuestos por un microprocesador y memoria, además tienen una interface para ADCs, UART, SPI, temporizadores y contadores. Hay muchos tipos de microcontroladores que van desde los 4 bits hasta 64 bits, con una variación del número de temporizadores, con diferentes consumos de energía.

Alimentación

La principal restricción tecnológica de los nodos sensores es la alimentación de energía. En la actualidad la nueva generación de motas nos permite tener operaciones continuas por unas cuantas horas, con un suministro de energía puede ser de dos diferentes formas

La primera consiste en equipar a cada nodo sensor con una fuente de energía que sea recargable, existen dos enfoques sobre este punto. La opción más dominante es utilizar celdas de batería de alta densidad, y la otra opción es usar celdas completas, las cuales son capaces de administrar una fuente de energía clara de alta densidad, el único inconveniente es que actualmente no se encuentran disponibles en un formato físico para una red de sensores (Martell, 2011) (Fernández, 2010).

La segunda solución es que el dispositivo sea capaz de capturar energía del ambiente, además de las celdas solares, las cuales ya se utilizan como una fuente alternativa en aplicaciones móviles. Se ha realizado un sinnúmero de propuestas referentes a la conversión de vibración a energía eléctrica, Se están utilizando sistemas inalámbricos sin baterías, que son capaces de transformar el calor del ambiente en energía con esto se puede alargar la vida del dispositivo (Fernández, 2010) (Inregantes del grupo de investigación EDMANS, 2009).

Comunicación inalámbrica

Es un dispositivo que permite enviar y recibir datos, vía radio frecuencia con el fin de comunicarse con los demás dispositivos que se encuentran dentro de su rango de transmisión. Los nodos utilizan la banda ISM, que es una banda internacional de radiofrecuencia reservada para uso no comercial en áreas industriales, científicas y médicas.

Las bandas de frecuencia ISM, están abiertas para todo el mundo, sin la necesidad de licencias, respetando las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida.

Los medios de elección para realizar una comunicación son diversos, pueden ser; radio frecuencia, comunicación óptica, o láser e infrarrojo. La ventaja de una comunicación por láser es que esta no tiene un consumo de energía mayor, pero la desventaja de esta es que requiere una línea de vista sin obstáculos entre emisor y transmisor, y otro factor es que depende de las condiciones atmosféricas (Fernández, 2010).

Se sabe que la comunicación por láser o infrarrojo, no requieren de una antena para su transmisión, lo que hace que su área de transmisión sea pequeña y posea una limitada capacidad de transmisión.

Para aplicaciones inalámbricas las más adecuadas son las de radio frecuencias, RF. Las frecuencias que son utilizadas en una red de sensores están entre 433 MHz y 2.4 GHz.

En el transceptor se combinan las funcionalidades de emisión y recepción, las operación son emitir, recibir, dormir e inactividad. En los actuales modelos de transceptores, el modo inactivo consume casi igual que el modo recepción. Por lo que es mejor tener completamente apagado las comunicaciones de radio cuando

entra en el modo Inactivo. También es significativa la cantidad de energía consumida cuando cambia de modo durmiente a transmisión de datos (Inregrantes deñ grupo de investigacion EDMANS, 2009).

Los sistemas más populares dentro de los sistemas de comunicación de radio para nodos de redes inalámbricos so son:

- Chipcon CC1000 <http://www.chipcon.com/>
- Chipcon CC1020 <http://www.chipcon.com/>
- Chipcon CC2420 <http://www.chipcon.com/>
- Xemics XE1205 <http://www.semtech.com/>
- 802.15.4 Chipsets and SoC <http://www.jennic.com/>

Una comparativa de las principales características de estos dispositivos es:

Tabla. 3. Características de dispositivos inalámbricos: Tomada de referencia (Inregrantes deñ grupo de investigacion EDMANS, 2009).

	CC1000	CC1021	CC2420	TR1000	XE1205
Fabricante	Chipcon	Chipcon	Chipcon	RFM	Semtech
Frecuencia de Operación [MHz]	300-1000	402-470/804-940	2400	916	433/868/915
Bit Rate [kbps]	76.8	153.6	250	115.2	1.2-152.3
Fuente de Alimentación [V]	2.1-3.6	2.3-3.6	2.1-3.6	2.2-3.7	2.4-3.6

Tabla. 4. Características de dispositivos inalámbricos: II Tomada de referencia (Inregrantes deñ grupo de investigacion EDMANS, 2009).

	CC1000	CC1021	CC2420	TR1000	XE1205
Modo Dormido [uA]	0.2-1.0	1.8	1.0	0.7	0.2
Modo Inactivo [uA]			426		850
RX [mA]	9.3 (433MHz) /11.8 (868MHz)	19.9	19.7	3.8 (115.2kbps)	14
TX Min [mA]	8.6 (-20 dBm)	14.5(- 20dBm)	8.5 (- 25dBm)		33 (+5dBm)
TX Max [mA]	25.4 (+5dBm)	25.1 (+5dBm)	17.4 (0dBm)	12 (+1.5dBm)	62(+15dBm)

Sensores

Uno de los componentes principales de los nodos sensores son los transductores, ya que estos transforman una forma de energía en otra. El diseño de transductores es considerado fuera del alcance de una arquitectura de sistemas. Adicionalmente, los sensores pueden tener otros componentes, tales como: conversores A/D, y microcontroladores (Hernandez E. J., 2007).

La opción de diseño más simple incluye solo el transductor; sin embargo, debido a que la tendencia actual es de dotar con una mayor “inteligencia” a los nodos sensores, se están adicionando características, como la capacidad de autoconfiguración, para que puedan establecer caminos de comunicación entre nodos sin visibilidad, y modificar estos caminos si alguno de los nodos que están dentro del encaminamiento falla. Como también protocolos de búsqueda la cual les permite conocer la posición de los diferentes nodos y por ende conocer la topología de la red.

Uno de los principales desafíos de las redes con sensores es seleccionar el tipo y cantidad de sensores y determinar su ubicación. Esta tarea es difícil debido a la enorme cantidad de tipos de sensores con diferentes propiedades tales como resolución, costo, exactitud, tamaño, y consumo de energía. En muchas veces se necesita más de un tipo de sensor para asegurar la veracidad de la información y operación. Otro desafío es seleccionar el correcto tipo de sensores y la forma de

operarlos. La dificultad puede existir cuando se quiere interactuar entre sensores. Y otros aspectos de diseño están dirigidos a lo que es, tolerancia a fallas, control de errores, calibración, y sincronización de tiempo (Hernandez E. J., 2007).

Memoria

Los requerimientos de almacenamiento en términos de rapidez y memoria no volátil en cada nodo son diferentes y varían dependiendo de la estructura de la red de sensores, si se sigue el modelo de arquitectura en el que toda la información es instantáneamente enviada al nodo central, no hay la necesidad que exista un almacenamiento local en los nodos individuales.

Sin embargo en un escenario real el objetivo es minimizar la cantidad de comunicación, y controlar la parte de computo de cada nodo individual, con lo necesidad de tener un almacenamiento local. Por lo menos existen dos alternativas para almacenar información en el nodo local. Adicionalmente, en el caso de que el nodo sea físicamente mayor, se puede almacenar la información en micro discos.

La primera solución es utilizar una memoria flash, ya que es de bajo costo y posee una gran capacidad de almacenamiento. Pero tiene relativas limitaciones en cuanto se refiere a las veces que puede ser usada para almacenar diferentes tipos de información en las mismas ubicaciones. Existen dos desafíos en cuanto a memorias no volátiles para usarlas en los nodos sensores: (1) el particionamiento de la memoria, para la reducción de energía y (2) el desarrollo de estructuras de memoria para ubicar la información corta de longitud de palabra producida por los sensores. Por otro lado, se aconseja usar técnicas de comprensión agresivas para reducir la cantidad de información que debe ser almacenada o transferida (Hernandez E. J., 2007).

2.4.2 Puerta de enlace

Elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (TCP/IP). Es un nodo especial sin elemento sensor, cuyo objetivo es actuar como puente entre dos redes de diferente tipo.

En este tipo de aplicaciones donde se usan redes de sensores, éstas no pueden operar completamente aisladas y deben contar con alguna forma de monitoreo y acceso a la información adquirida por los nodos de la red de sensores. De aquí surge la necesidad de conectar las redes de sensores a infraestructuras de redes existentes tales como Internet, redes de área local (LAN) e intranets privadas. Los dispositivos que realizan la función de interconectar dos redes de diferente naturaleza se les llama dispositivo puerta de enlace; pero el término más conocido en el ambiente de las redes es Gateway (Hernandez E. J., 2007).

2.4.3 Estación Base

Recolector de datos basado en un ordenador común o sistema empujado. En una estructura normal todos los datos van a parar a un equipo servidor dentro de una base de datos, desde donde los usuarios pueden acceder remotamente y poder observar y estudiar los datos.

2.5 Estándar IEEE 802.15.4 / ZigBee

El estándar IEEE 802.15.4 es un rama de trabajo del grupo IEEE 802 que se enfoca en redes inalámbricas de área personal (wireless personal area networks, WPAN). Este estándar se subdivide en 5 grupos (Espinosa, 2008).

Primer Grupo: IEEE 802.15.1 (WPAN / Bluetooth)

IEEE 802.15.1 – 2002 desarrolla a partir del estándar basado en la especificación versión 1.1 que incluye el nivel físico (PHY) y control de acceso al medio (MAC). En el 2005, se lanza una versión actualizada.

Segundo Grupo: IEEE 802.15.2 (Coexistencia)

IEEE 802.15.2-2003, fue desarrollado en el 2003 estudia los posibles dificultades producidos por la convergencia de WPANs con otros dispositivos inalámbricos que utilicen las bandas de frecuencia no reguladas, tales como redes inalámbricas de área local WLAN (Wireless Lan Area Network).

Tercer Grupo: IEEE 802.15.3 (WPAN de alta velocidad)

IEEE 802.15.3 – 2003 es un estándar que define los niveles PHY y MAC para WPANs de alta velocidad (11-55 Mbps).

Tercer Grupo-a: IEEE 802.15.3a (PHY alternative para WPAN de alta velocidad)

IEEE 802.15.3a intentó realizar mejoras en la capa física para el uso de Ultrawireband (UWB), o banda ultra ancha, para aplicaciones que trabajen con elementos multimedia.

Realizó la consolidación de 23 especificaciones de PHY para UWB en dos propuestas utilizando multiplexación por división de frecuencias ortogonal multibanda (Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MB-OFDM) en UWB y UWB en secuencia directa (DS-UWB).

Tercer Grupo-b: IEEE 802.15.3b (revisión MAC)

IEEE 802.15.3b trabaja en el desarrollo de mejoras a 802.15.3 para refinar la implementación e interoperabilidad de MAC.

Tercer Grupo-c: IEEE 802.15.3c (PHY alternative de onda milimétrica)

Este grupo (TG3c) se formó en marzo del 2005 y trabaja en el desarrollo de una PHY alternativa basada en ondas milimétricas para el estándar 802.15.3 – 2003.

Cuarto Grupo: IEEE 802.15.4 (WPAN de baja velocidad)

IEEE 802.15.4 – 2003 (WPANs de baja velocidad, Low Rate WPAN), este estándar se basa en las necesidades de sistemas con poca capacidad de transmisión de datos, pero con un tiempo de vida útil, una alimentación limitada (con baterías) y una complejidad muy baja. El protocolo ZigBee se basa en la especificación producida por este grupo de trabajo.

Cuarto Grupo -a (PHY alternativa)

El principal interés de este grupo es permitir comunicaciones y facilidades de localización de alta precisión, alta productividad agregada y necesidades energéticas extremadamente reducidas. También se busca la escalabilidad en las tasas de datos, distancias de transmisión, costes y consumo.

Cuarto Grupo -b (Revisiones y mejoras)

Este grupo se inició con un proyecto de realización de mejoras y aclaraciones específicas sobre IEEE 802.15.4-2003. Entre estos objetivos se encuentran la resolución de ambigüedades y reducción de complejidad

innecesaria, el incremento en el uso de claves de seguridad, las consideraciones para el uso de nuevos rangos de frecuencias disponibles y otros aspectos.

2.5.1 Capa física PHY

Es necesario conocer las características del canal inalámbrico, ya que, es el medio por el cual los sensores se comunican. Teniendo en cuenta que existen varios factores que afectan las comunicaciones como las bandas de frecuencias, la potencia de transmisión, el esquema de modulación, el tipo de transceptores, y el consumo de energía en la radio comunicación. Una de las diferencia entre las redes ad hoc y redes WSN es el ancho de banda y la modulación que se utiliza para el manejo de los paquetes de datos.

Las frecuencias de trabajo no son las mismas en todas las regiones. La Tabla.5, describen las frecuencias, el número de canales y velocidad de datos de cada rango de frecuencia.

Tabla. 5. Frecuencias de trabajo para IEEE 802.15.4 – 2003: Tomada de referencia (Espinosa, 2008).

BANDAS DE FRECUENCIA	COBERTURA	CANALES	VELOCIDAD DE DATOS
2.4 – 2.4835 GHz	Todo el mundo	16	250 Kbps
902 – 928 MHz	América	10	40 Kbps
868 – 868.6 MHz	Europa	1	20 Kbps

La Tabla 5, describe las bandas de frecuencias de trabajo de las Redes de Sensores Inalámbricos. Se puede notar que el Ancho de banda para la transmisión de datos es proporcional a la frecuencia, es decir, a una mayor frecuencia se tiene un ancho de banda más grande. El uso de las frecuencias corresponde a cuestiones legales del uso del espectro radioeléctrico de cada país o región.

En la Figura.10, se puede observar el modelo correspondiente al estándar 802.15.4-2003, donde se puede divisar la capa física (PHY), la capa de Control

de Acceso al Medio (MAC) y la capa de red ZigBee que explicara más adelante (Arano, 2009).

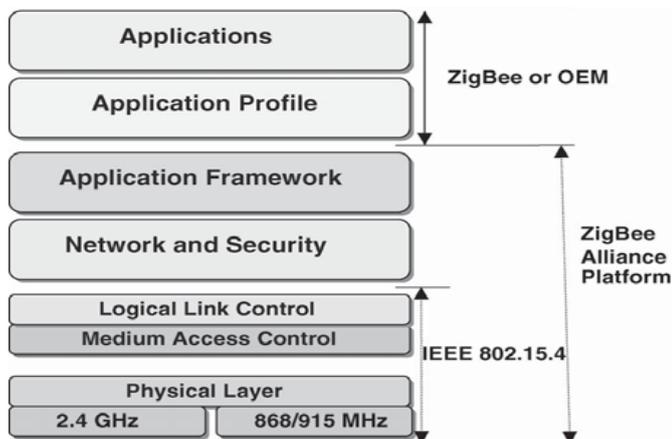


Figura. 10. Estándar IEEE 802.15.-2003.

Este estándar IEEE 802.15.4 es desarrollado en base al modelo de referencia OSI (Open System Interconnection). El cual involucra las principales capas de este, la capa física, la capa MAC y la capa de control lógico de enlaces. Por otro lado Zigbee al ser parte del estándar IEEE 802.15.4, añade otras capas como, la capa de seguridad de la red, el marco de aplicaciones y el perfil de aplicaciones. Y sobre todas estas se encuentra el usuario (Arano, 2009).

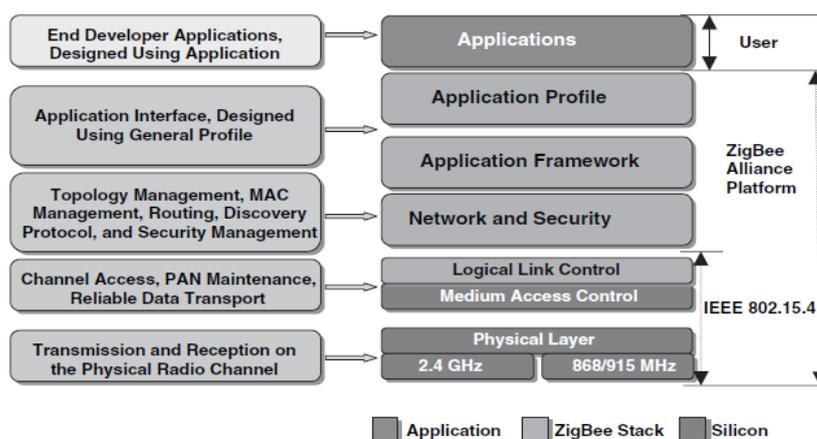


Figura. 11. Estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee.

En la capa física del modelo de referencia, tolera todas las operaciones que realiza la capa MAC, también posee características como, detección de energía del

receptor, un indicador de la calidad del enlace, y verifica la claridad que existe en el canal. También posee una variedad de operaciones como, un ciclo de trabajo bajo, administración de energía, y bajas tasas de transmisión (Arano, 2009).

Tabla. 6. Principales parámetros de la capa PHY IEEE 802.15.4: Tomada de referencia (Kazem Sohraby, Daniel Minoli, 2007).

PARAMETRO	2.4 GHz PHY	868/915 MHz PHY
Sensibilidad	- 85 dBm	- 92 dBm
Nivel máximo de entrada en el Receptor	- 20 dBm	
Rechazo de canal adyacente	0 dB	
Rechazo de canal alterno	30 dB	
Potencia de salida, la más baja máxima	- 3 dBm	
Precisión de la modulación de transmisión	- para 1000 chips	
Número de canales	16	1/10
Espacio entre canales	5 MHz	NA*/2 MHz
VELOCIDAD DE TRANSMISION		
Velocidad de datos	250 kbps	20/40 kbps
Velocidad de símbolo	62.5 kilosímbolos/sec	20/40 kilosímbolos/sec
Chip rate	2 megachips/sec	300/60 kilochips/sec
Modulación de chip	O-QPSK con forma de pulso semisinusoide (MKS)	BPSK con forma de pulso coseno alzado
Tiempo de transmisión TX-RX y RX-TX	12 símbolos	

La Tabla.6, muestra algunos parámetros importantes que son tomados por la capa física. Fundamentalmente tiene que ver con modulaciones, potencias de

transmisión y recepción y las velocidades de transmisión para las distintas bandas de frecuencia.

La capa física se diseñó en base a la necesidad de obtener principalmente una eficiencia energética de bajo costo. Operando en las bandas de frecuencias descritas en la Tabla.6, el estándar IEEE 802.15.4 define 3 medios físicos distintos:

1.- Espectro ensanchado de secuencia directa (Direct-Sequence Spread Spectrum), utiliza la modulación BPSK en las bandas de frecuencia de 868 MHz a la velocidad de 20 kbps.

2.- Espectro ensanchado de secuencia directa (Direct-Sequence Spread Spectrum), utiliza la modulación BPSK en las bandas de frecuencia de 915 MHz a la velocidad de 40 kbps.

3.- Espectro ensanchado de secuencia directa (Direct-Sequence Spread Spectrum), utiliza la modulación O-QPSK en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz a la velocidad de 140 kbps.

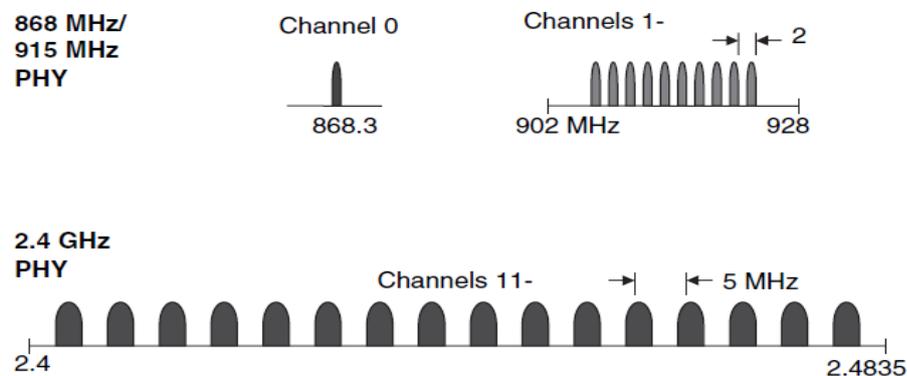


Figura. 12. Bandas de frecuencia de la capa física de IEEE 802.15.4.

En la Figura.12, se puede observar las bandas de frecuencias, los canales de comunicaciones y sus anchos de banda. Como se dijo antes a mayor frecuencia, se

obtienen mayor número de canales, lo cual desde un punto de vista es muy ventajoso.

La siguiente figura muestra como es la estructura de paquetes de la capa física.

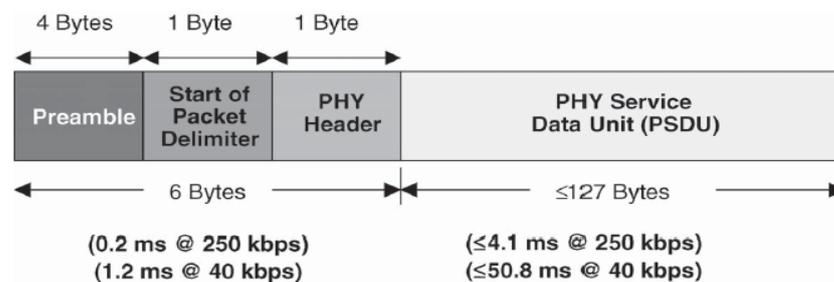


Figura. 13. Estructura del paquete de la capa física IEEE 802.15.4 PHY (Kazem Sohraby, Daniel Minoli, 2007).

La Figura.13, nos muestra que el primer campo contiene 32 bits de preámbulo. En este campo se realiza la sincronización de símbolos. El siguiente paquete indica el inicio de un delimitador de paquete, contiene 8 bits y se utiliza para sincronización de las tramas. El campo del encabezado PHY de 8 bits especifica la longitud de la unidad de servicio de datos PHY (PSDU). El campo PSDU puede transportar hasta 127 bytes de datos.

2.5.2 Capa de Acceso al Medio MAC

Esta capa se encarga de proporcionar un mecanismo para el control del acceso al medio de comunicaciones compartido por todos que quieren acceder a él. La característica principal de una WSN es que determinan los requerimientos del protocolo MAC. Se sabe que el protocolo MAC, genera inconvenientes cuando se trabaja con otras redes inalámbricas, esto se lo puede corregir adaptando el protocolo MAC Ethernet al contexto diferente de una red de radio, reemplazando un CSMA/CD por CSMA/CA.

Existen algunos problemas que interfieren con el óptimo funcionamiento del protocolo MAC, estos pueden ser, el no tener una transmisión de paquetes full dúplex, interferencia en el receptor y que puede sufrir variaciones según el transmisor, un nivel alto de las tasas de error de la información receptada. Los requerimientos mínimos en la capa MAC, serian, un alto rendimiento, un consumo de energía bajo, bajas tasas de error, y el manejo del apagado del dispositivo, etc (Arano, 2009).

Hay varias formas para acceder al medio inalámbrico, utilizando sistemas centralizados y distribuidos. Estos sistemas funcionan en base a un calendario o programa establecido, o según la demanda que exista de la aplicación. La Figura.14, describe el ingreso al medio inalámbrico en una WSN.

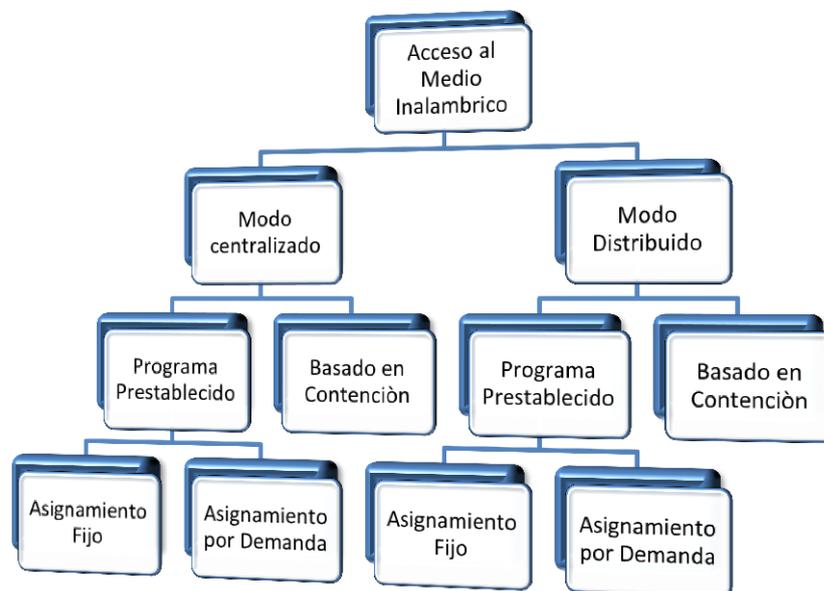


Figura. 14. Opciones de acceso al medio inalámbrico en una WSN.

La capa MAC del IEE 802.15.4, está diseñada para soportar un gran número de aplicaciones industriales y aplicaciones caseras de control y monitoreo. Estas aplicaciones se caracterizan por tener bajas velocidades en la transmisión de datos

y un moderado tiempo de retardo, esto hace que se reduzca la complejidad de la capa MAC (Arano, 2009).

- **Estructura de la Súper trama:**

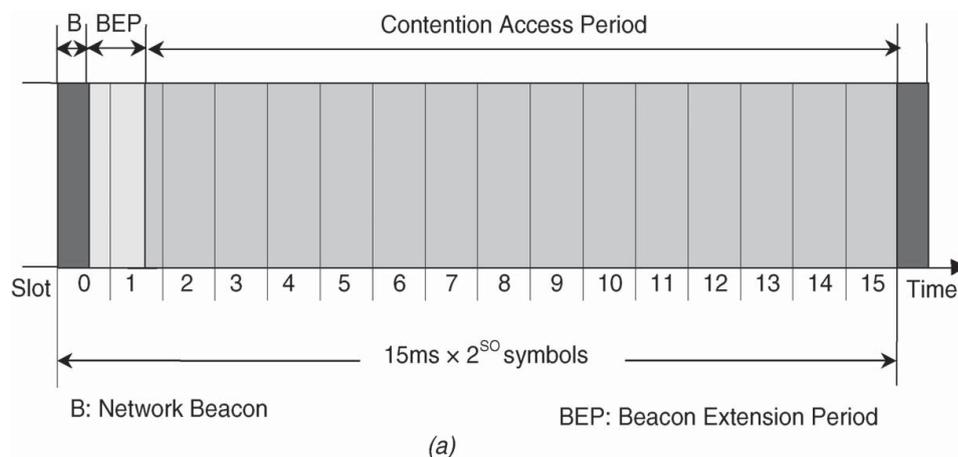
El IEEE 802.15.4, define una súper trama opcional, es inicializada por el coordinador PAN, es decir que el formato de esta trama la define el coordinador. Tiene 16 ranuras con tiempos iguales, la primera ranura sirve para transmitir la baliza, el objetivo de la baliza es sincronizar los dispositivos añadidos, identificar la red PAN, y detallar cual es la estructura de la súper trama. El resto de las ranuras de tiempo son utilizadas por los dispositivos quienes compiten por las comunicaciones durante el periodo de acceso por contención CAP (Contention Access Period). El dispositivo utiliza el protocolo CSMA/CA para ganar el acceso a la competencia de las ranuras de tiempo.

Para cubrir con los requerimientos de latencia y ancho de banda de las aplicaciones soportadas, el nodo coordinador PAN, fija grupos de ranuras de tiempo una alado de la otra, que activen la súper trama de aplicaciones. Estas ranuras llevan el nombre de ranuras de tiempo garantizadas GTS (Guaranteed Time Slots), y no pueden estar conformadas por más de siete ranuras. El conjunto de estas ranuras forman lo que se conoce como periodo libre de contención CFP (Contention Free Period), está ubicado al final de la súper trama activa y al comienzo de la próxima CAP. El CAP conserva el acceso basado por contención entre los nodos en red y los nuevos dispositivos que quieren acceder a la red.

Los dispositivos que necesitan localización GTS, sus requerimientos son enviados durante el periodo CAP, con el fin de reservar un número de ranuras de tiempo contiguas. Estas ranuras pueden ser para recepción o transmisión, las ranuras de recepción son para buscar datos desde el coordinador, en cambio las ranuras para transmisión son utilizadas por el dispositivo para enviar datos al coordinador. Los dispositivos que no poseen información para intercambiar pasan

al estado de adormecimiento para el ahorro de energía. Esperando cambiar al estado activo, durante sus GTS localizados.

Para mantener un consumo de energía bajo, el nodo coordinador emite una súper trama que contiene un periodo activo y libre. El periodo activo va a estar compuesto por 16 ranuras de tiempo, que contiene la baliza de la ranura y la ranura de tiempo CAP. El periodo inactivo define un slot de tiempo necesario para que todos los nodos incluyendo al nodo coordinador puedan ir al modo de adormecimiento. En este modo, el dispositivo de red cambia su energía y fija un temporizador para despertarse antes de que anuncie la próxima trama tipo baliza. Dependiendo del tipo de aplicación de la red, y los dispositivos que están conectados, el periodo de inactividad varía y puede ser fijada a cero. Las siguientes figuras muestran la estructura de las diferentes tramas y sus componentes.



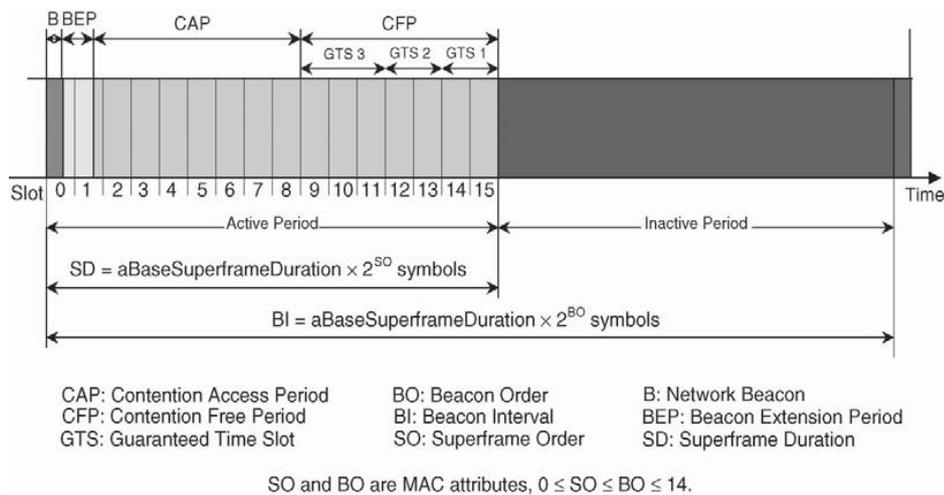
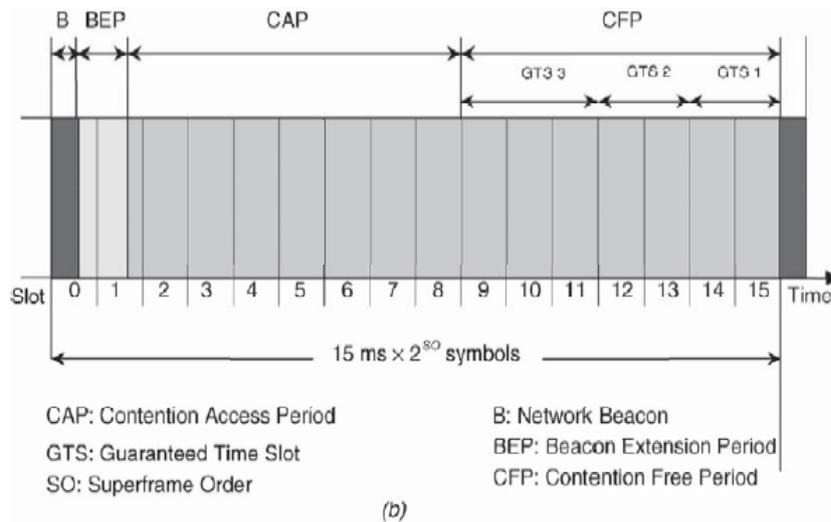
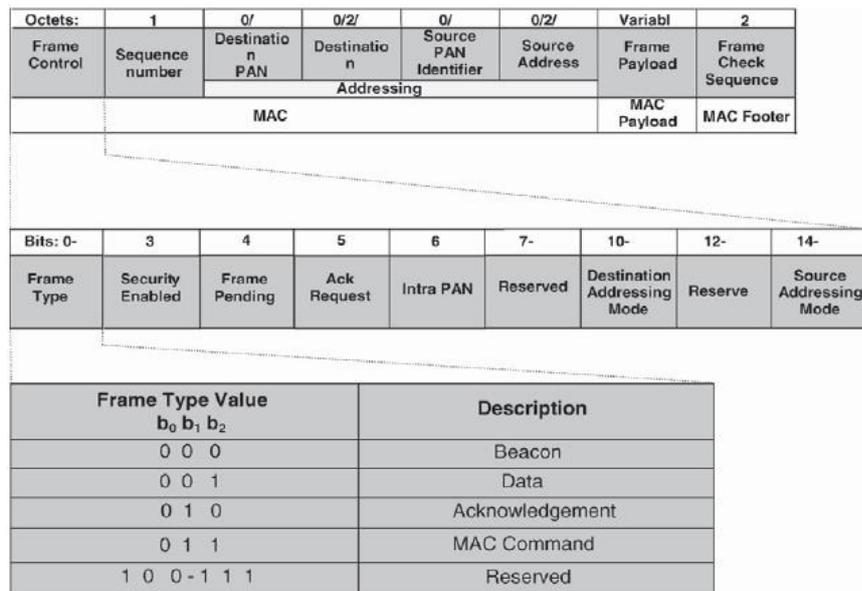


Figura. 15. a) Estructura de Súper Trama, b) Estructura de la trama QoS, c) Estructura de la Súper trama con ahorro de energía (Kazem Sohraby, Daniel Minoli, 2007).

✓ **Tipos de tramas:**

La Figura.16, nos da una representación de la estructura general de la MAC, indicando sus tres componentes básicos: cabecera MAC (MAC header), carga MAC (MAC payload) y pie de la MAC (MAC footer).



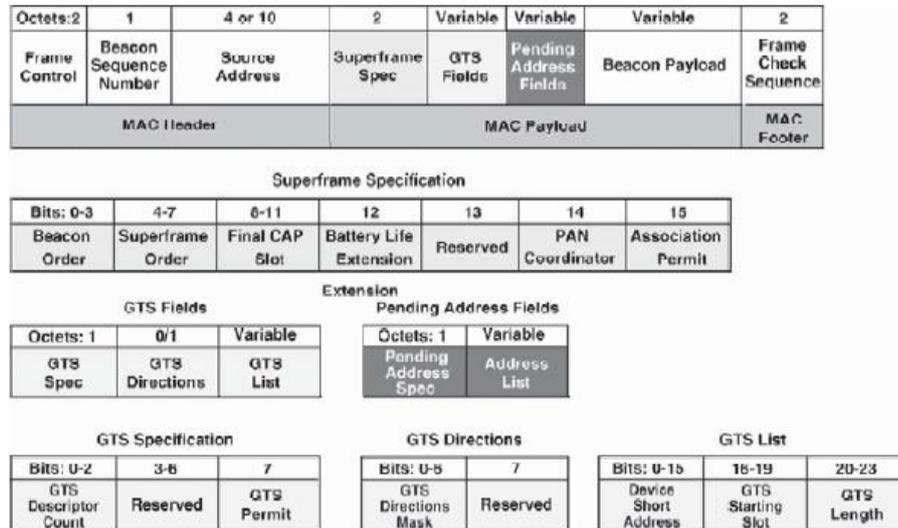
(a)

Figura. 16. Formato general de la trama MAC.

El MAC header contiene un campo de trama de control y el campo de direccionamiento. El campo de control lleva el tipo de trama y una información adicional, necesaria para la operación y control de la red. El direccionamiento especifica el identificador del PAN fuente, la dirección del nodo fuente, el identificador del destino PAN, y la dirección destino. El MAC payload contiene los datos de la trama a ser intercambiados entre los dispositivos en comunicación. El MAC footer contiene el campo de chequeo de secuencia de la trama. Este campo se utiliza para detectar errores (Espinosa, 2008).

El IEEE 802.15.4 define cuatro tipos básicos de tramas: la trama beacon (baliza), la trama de datos, la trama de reconocimiento (acknowledgment), y la trama de comandos MAC. La trama beacon es transmitida periódicamente por el nodo coordinador. Esta trama tiene muchas funcionalidades, incluyendo el identificador de la red y su estructura, despertando a los dispositivos de su estado de adormecimiento y pasándolos al modo de escucha, y sincronizando sus operaciones con la red. La trama beacon es muy importante en las topologías tipo árbol y malla, ya que esta mantiene todos los nodos sincronizados sin que los nodos se hallen despiertos por largos periodos de tiempo, de esta manera se

reduce el consumo energético y se extiende la vida de la batería. La trama beacon y sus campos se hallan descritos en la Figura.17.



(b)
Figura. 17. Formato de la trama Beacon (Kazem Sohraby, Daniel Minoli, 2007).

La trama de datos está compuesta hasta 104 octetos. Cada trama tiene un número de secuencia que identifica a la trama de manera única. Este número de secuencia asegura que todas las tramas se hallan contabilizadas y se recibirán en orden. El campo PCS se utiliza para detectar errores de trama.

La trama de reconocimiento se utiliza para recibir una confirmación de haber recibido la trama de datos. La recepción de este reconocimiento en el transmisor de datos constituye una confirmación de que la trama de datos correspondiente ha sido recibida sin errores y en orden. En la Figura.18, se explica de manera gráfica la trama de datos y la trama de reconocimiento.

Data Frame Format

Octets:2	1	4 to 20	variable	2
Frame Control	Data Sequence Number	Address Information	Data	Frame Check Sequence
MAC			MAC Payload	MAC Foote

Acknowledgement Frame Format

Octets:	1	2
Frame Control	Data Sequence Number	Frame Check Sequence
MAC		MAC Foote

(c)
Figura. 18. Formato de la trama de Datos y Reconocimiento (Kazem Sohraby, Daniel Minoli, 2007).

La trama de comandos MAC se utiliza para la negociación y comunicación en diferentes dispositivos, tiene los mecanismos para administrar una red centralizada, de manera que se puede controlar y configurar los dispositivos de forma remota, indistintamente del tamaño de la red y su tipo de topología. Ciertos comandos admiten asociaciones o separación de solicitudes, requisitos de datos, notificación de conflictos de identificación de las ID PAN, notificaciones de abandono de la red, solicitud beacon, solicitud de GTS, y reajuste del coordinador. Esta trama se indica en la siguiente figura (Espinosa, 2008).



MAC command frames

Command frame identifier	Command name	RFD		Subclause
		Tx	Rx	
0x01	Association request	X		7.3.1
0x02	Association response		X	7.3.2
0x03	Disassociation notification	X	X	7.3.3
0x04	Data request	X		7.3.4
0x05	PAN ID conflict notification	X		7.3.5
0x06	Orphan notification	X		7.3.6
0x07	Beacon request			7.3.7
0x08	Coordinator realignment		X	7.3.8
0x09	GTS request			7.3.9
0x0a-0xff	Reserved			—

Figura. 19. Formato de la trama de comandos MAC.

Cuando la capa MAC recibe una trama, está la procesa para determinar qué acciones son requeridas. Para poder realizar este trabajo, la capa MAC requiere un espacio de tiempo entre tramas (Interframe Spacing, IFS), la duración depende si fue reconocida o rechazada la transacción (Espinosa, 2008).

✓ Modos de operación:

La capa MAC del estándar IEEE 802.15.4 está diseñada para poder atender cualquier clase de requerimientos de tráfico, cada uno con su diferente perfil de datos y requerimiento de latencia. Este estándar define tres tipos de datos, datos periódicos, datos intermitentes, y datos respectivos de baja latencia.

✓ Datos periódicos:

Estos datos están presentes en las aplicaciones de los sensores inalámbricos, donde estos dispositivos cambian su estado de activo a inactivo y viceversa (Espinosa, 2008).

✓ **Datos intermitentes:**

Se encuentran en aplicaciones en base a estímulos.

✓ **Datos repetitivos de baja latencia:**

Están definidas por aplicaciones críticas como son, los sistemas de seguridad y monitoreo. Este tipo de aplicaciones exigen localización de ranuras de tiempo para garantizar el acceso al canal con su latencia y tolerancia a fallas. Este estándar puede operar con modo beacon o sin él.

✓ **Modo de operación con Beacon:**

Este modo es utilizado en topologías de malla o tipo árbol, con el objetivo de poder sincronizar sus operaciones y coordinar las comunicaciones de cada uno. También sirve para que los dispositivos se despierten de su modo de adormecimiento.

✓ **Localización GTS:**

Para reservar el intercambio de datos, un dispositivo envía una solicitud explícita al coordinador de la red, especificando el tipo, es decir si es de transmisión o recepción, y el número de ranuras contiguas requeridas. En la ranura de transmisión se envía datos al coordinador, y en la ranura de recepción se envía los requerimientos del dispositivo.

✓ **Acceso al canal basado en contención:**

El acceso al medio durante CAP de un periodo activo se regula mediante protocolos de hardware CSMA ranurados. No usa mecanismos, como RTS/CTS.

2.5.3 Clases de redes inalámbricas de corto alcance

Las redes inalámbricas de corto alcance se dividen en dos categorías: WLAN's y WPAN's.

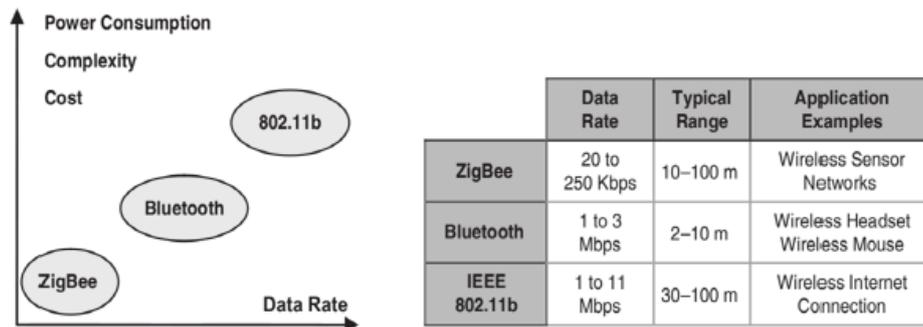


Figura. 20. Comparación entre los estándares ZigBee, Bluetooth, IEEE 802.11 (Kazem Sohraby, Daniel Minoli, 2007).

La Figura.20, muestra los tres tipos de tecnología inalámbrica, con sus respectivos rangos de cobertura y las tasas de transmisión de bits por segundo.

Las diferencias que podemos sacar, WLAN posee el máximo alcance y la tasa de transmisión, por otro lado WPAN, se enfoca en dar una eficiencia energética a cortas distancias con una tasa de transmisión baja (Espinosa, 2008) (Kazem Sohraby, Daniel Minoli, 2007).

2.5.4 Relación entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4

La forma más simple de instalar una red de comunicaciones ya sea cableada o inalámbrica, es aplicar el concepto de capas de red. Se sabe que cada capa de red es responsable de ciertas funciones específicas en la red, La Figura.21, nos muestra el modelo del estándar del protocolo inalámbrico ZigBee.



Figura.21. Capa modelo del protocolo inalámbrico ZigBee.

ZigBee es un estándar basado el modelo OSI (Open System Interconnect). Con la diferencia, que las aplicaciones en las capas inferiores son independientes de la capa de aplicación. Las capas PHY y MAC de este estándar fueron desarrolladas por IEEE 802.15.4-2003. El estándar ZigBee solamente define las capas de red, aplicación y seguridad. El estándar IEEE 802.15.4, este se lo desarrollo a la par que ZigBee, también se lo puede utilizar para implementar redes de corto alcance. Con la diferencia que los usuarios son los que deben crear sus propias aplicaciones de red (Espinosa, 2008).

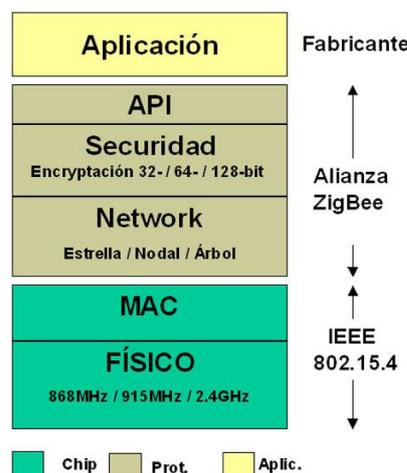


Figura. 22. Protocolo de red IEEE802.15.4, que no contiene el estándar ZigBee.

En la Figura.22, se observa que las capas PHY y MAC del estándar IEEE802.15.4 – 2003, no están dentro al estándar ZigBee. Las demás capas que están arriba de la capa MAC, corresponde a definiciones de usuarios, como es el caso de la alianza ZigBee. La gran ventaja que se tiene al tener dispositivos que trabajen con ZigBee, es la interoperabilidad (Espinosa, 2008).

2.6 Sistema de Monitoreo Inalámbrico

Un sistema de monitoreo inalámbrico está formado por una variedad de dispositivos que pueden estar localizados en sitios remotos, los cuales nos permiten examinar y controlar datos de manera remota. Son capaces de trabajar con diferentes protocolos en un conjunto de aplicaciones, permitiendo la comunicación entre componentes, para la conformación de una base de datos, que será administrada por subsistemas posteriores. Los dispositivos que componen estos sistemas, son los sistemas de posicionamiento global o GPS, sensores que miden las variables físicas, transceptores, nodo central, sistemas de información geográfica, entre otros (Espinosa, 2008).

2.7 Software de simulación de la red WSN mediante NS2

Modelar analíticamente una red de sensores inalámbricos es de muy alta complejidad. Para realizar esto se debe considerar algunos factores como son, el escenario de simulación, la capa física, capa MAC, número de sensores, el tipo de aplicación entre otros. Fundamentalmente una simulación es el estudio del comportamiento de estos factores dentro de la una red en nuestro caso una WSN. Para esto se debe saber cuál es el modelo matemático a seguir, que simulador se va a utilizar, con qué modelo de propagación se va a trabajar, los protocolos de comunicación, las características de transmisión y recepción que van a tener los equipos (Espinosa, 2008).

Un simulador es un software que nos permite crear y modelar un escenario con condiciones reales, la mayoría de estas herramientas poseen una interfaz gráfica la cual nos ayuda a operar de forma mejor los componentes de la red.

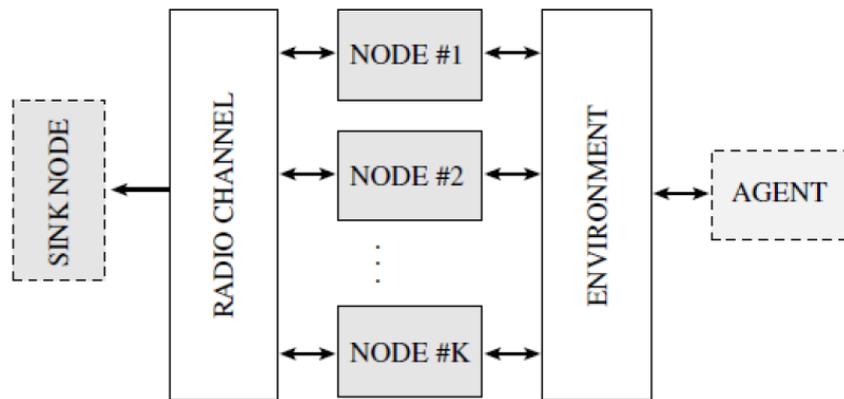


Figura. 23. Modelo de Wireless Sensor Network (UC Berkeley LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, 2010).

La Figura.23, nos da una noción general de un modelo que utilizan los simuladores de redes. Aquí se definen algunos parámetros como son, los nodos que conforman, el modelo del canal de propagación, el escenario de propagación y los agentes que se utilizan.

Existen algunas herramientas que nos permiten analizar el comportamiento de una red de sensores inalámbricos como por ejemplo NS2, OPNET, entre otros.

Network Simulator (NS2) es un simulador discreto de eventos creado por la Universidad de Berkeley para modelar redes de tipo IP. Para realizar la simulación se considera parámetros como el tipo de topología de la red y el tráfico de paquete que posee, Al variar estos parámetros se puede diagnosticar el comportamiento de la red, ya sea cableada o inalámbrica.

Para las redes cableadas se utiliza protocolos de ruteo como DV (distance vector), LS (link state) y multicast, y protocolos de transporte como TCP, UDP, RTP y SCTP. Las fuentes de tráfico pueden ser web, ftp, telnet, cbr y stochastic.

Se pueden manejar colas tipo drop-tail, RED, FQ y DRR (UC Berkeley LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, 2010).

A diferencia que para las redes inalámbricas se utilizan protocolos de ruteo AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) utilizado para redes móviles ad-hoc, DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) e IP móvil.

La facilidad de esta herramienta es que podemos visualizar los nodos y analizar las trazas y otras opciones. Este simulador está desarrollado en C++, y posee un funcionamiento básico como muestra la Figura.24 (UC Berkeley LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, 2010).

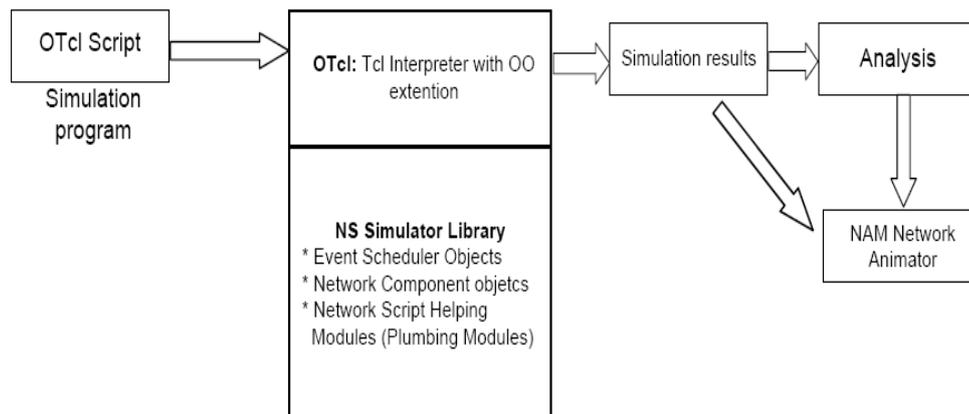


Figura. 24. Funcionamiento del NS2.

La Figura.24, muestra un esquema del funcionamiento del sistema de simulación, la entrada es a través de un script escrito en OTcl, que tiene algunas librerías las cuales definen variables como, el tipo de topología de la red, el canal de comunicación, los protocolos de comunicación, el tipo de tráfico, la calendarización de los eventos, tiempo de simulación, etc. Los componentes del sistema NS2 serán explicados a continuación:

Script OTcl

Este componente permite describir el conjunto de tareas a realizarse durante toda la simulación. Entre las tareas programadas, se pueden describir las siguientes:

- ✓ Creación del programador de eventos.
- ✓ Activación de seguimientos.
- ✓ Creación de la red.
- ✓ Configuración del ruteo.
- ✓ Inserción de errores.
- ✓ Creación de conexiones de transporte.
- ✓ Creación de tráfico.
- ✓ Transmisión de datos a nivel de aplicación.

Intérprete OTcl y librerías

El simulador NS2 está orientado a objetos desarrollado en C++ con un intérprete OTcl. Soporta clases jerárquicas en C++ y en OTcl a fin de crear un objeto a través del intérprete. Por lo que, se requiere tener dos tipos de lenguajes diferentes para que se pueda ejecutar distintas tareas del simulador. En el uno se tienen los protocolos que se manejan en el orden de los bytes y paquetes, y algoritmos que manejan grandes cantidades de datos. Y en el otro están los parámetros de configuración para la simulación en diferentes escenarios.

2.7.1 Simulación y resultados

Los resultados de la simulación son desplegados un archivo con extensión .tr que registra todos los eventos programados. El formato básico del archivo *.tr se muestra en la siguiente figura (UC Berkeley LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, 2010).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
events (event os)	time (tiem po)	from node (nod o oríge n)	to nod e (no do dest i)	pkt type (tipo de paque te)	pkt size (tama ño de paque te)	flags (bande ras)	fid (identifica ción de flujo)	src addr (direcc ión)	dst addr (direcc ión)	seq num (númer o secuen cia)	pkt id (identifica ción de paquete)

```

r : receive (at to_node)
+ : enqueue (at queue)          src_addr : node.port (3.0)
- : dequeue (at queue)         dst_addr : node.port (0.0)
d : drop (at queue)

r 1.3556 3 2 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
+ 1.3556 2 0 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
- 1.3556 2 0 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
r 1.35576 0 2 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
+ 1.35576 2 3 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
d 1.35576 2 3 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
+ 1.356 1 2 cbr 1000 ----- 2 1.0 3.1 157 207
- 1.356 1 2 cbr 1000 ----- 2 1.0 3.1 157 207

```

Figura. 25. Estructura del archivo de salida *.tr.

La Figura.25, indica la estructura *.tr, donde:

1.- events: representa uno de los cuatro posibles eventos; r (recibido), + (puesto en cola), - (sacarlo de la cola), y d (desechados o dropped). Para las redes inalámbricas los eventos son r (recibido), s (enviados), f (transmitido).

2.- Representa el tiempo en que ocurren los eventos.

3.- Es el nodo que al comienzo del enlace registra todo el evento.

4.- Es el nodo al extremo del enlace en el cual ocurre el evento.

5.- Representa el tipo de paquete, por ejemplo TCP, CBR, UDP, ACK, y otros paquetes más.

6.- Representa el tamaño del paquete.

7.- Representa algunas banderas de control.

8.- Es un identificador de flujo.

9.- Representa la dirección origen del nodo.

10.- Representa la dirección destino utilizada por el simulador.

11.- Es un indicador de secuencia de paquete de la capa de red. Este campo siempre está lleno ya que lo requiere el simulador.

12.- Es un identificador único de paquete.

2.7.2 Análisis gráfico de la salida NAM

El análisis de los resultados se lo realiza a través de una herramienta llamada Network Animator (NAM). Está basado en TCL/TK para visualizar las trazas de la simulación de una red y los paquetes de datos a partir de un archivo de trazas *.tr, este archivo contiene la información de los nodos, tipo de topología y el enlace (TRACEGRAPH).

La Figura.26, muestra la interfaz gráfica de la herramienta NAM.

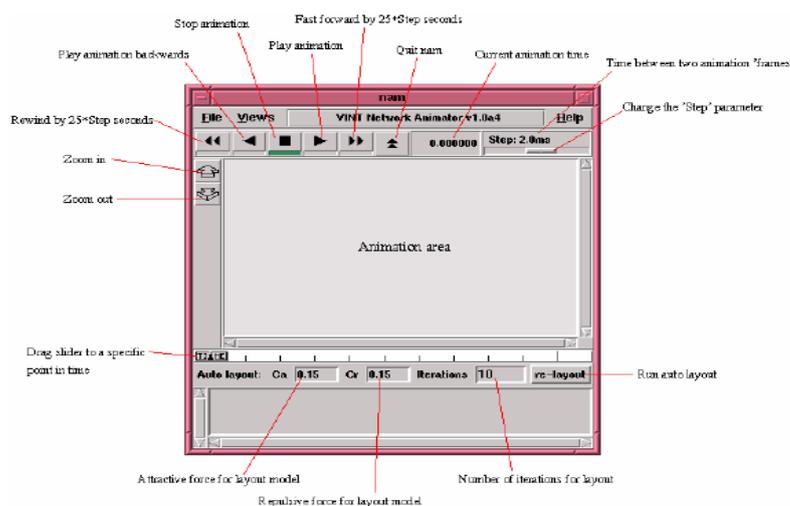


Figura. 26. Interfaz gráfica de la herramienta NAM (Espinosa, 2008).

La Figura.26, muestra algunos componentes como:

- ✓ Animation Area: Es en donde se puede visualizar la topología de la red especificada en el simulador.
- ✓ Zoom In /Zoom Out: Este botón permite aumentar o disminuir el área de simulación.
- ✓ Stop/Play Animation: Botón que permite iniciar la simulación o detenerla.
- ✓ Current Animation Time: muestra el tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación. El tiempo máximo se halla determinado al inicio de la simulación.
- ✓ Step: indica la velocidad con la que transcurre la simulación. Está marcado en milisegundos.
- ✓ File: permite grabar la simulación, imprimir el área de simulación, etc.

2.7.3 Herramienta Tracegraph

Esta aplicación es muy útil cuando se trabaja con el simulador NS2, ya que podemos eliminar la necesidad para configurar y ejecutar otras aplicaciones complejas que no necesitemos sobre los archivos de trazas para tener un mejor análisis.

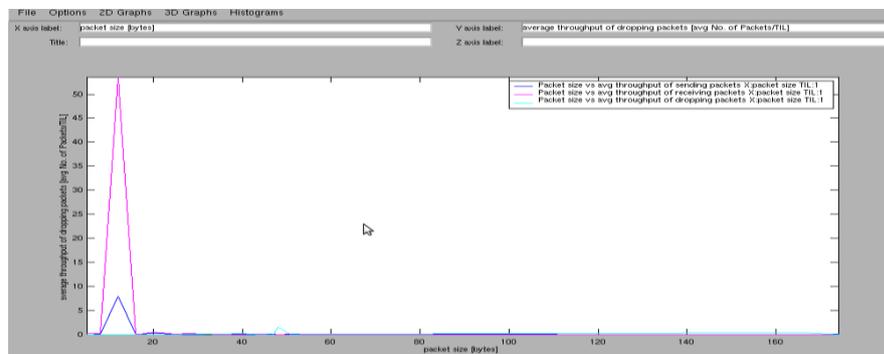


Figura.27. Interfaz de TraceGraph 2.2 (TRACEGRAPH).

La Figura. 27, muestra los resultados luego del análisis de un archivo de trazas *.tr. Entre los resultados más importantes están:

✓ La suma acumulada de paquetes transmitidos, la suma acumulada de paquetes recibidos y perdidos. El rendimiento (Throughput) de nodos específicos. El Jitter, y retardo (Delay).

Con estos datos se puede estimar la Calidad de Servicio (QoS) que posee la red de sensores inalámbricos para un entorno y tipo de topología determinado.

2.7.4 Modelos de Radio propagación

Los modelos de propagación se basan en ecuaciones matemáticas que se utilizan para poder estimar cual es la potencia de la señal cuando se recibe un paquete. En cada nodo sensor en su capa PHY, existe un nivel de recepción. Es decir que si se recibe un paquete, y la potencia de la señal captada es más baja que este umbral, La recepción es marcada como un error de paquete perdido en la capa MAC.

Hasta la actualidad existen tres modelos de propagación que se utilizan en el simulador NS para el análisis y estos son: modelo del espacio libre, modelo de dos rayos reflejados en tierra, y modelo de sombra (shadowing) (Espinosa, 2008).

Modelo del espacio libre

Este modelo de propagación se basa que la propagación entre transmisor y emisor posee condiciones ideales, es decir que la línea de vista entre emisor y receptor es lineal. Ing. Harald Trap Friis, presento la siguiente expresión que sirve para calcular la potencia de recepción en el espacio libre a una distancia d entre el emisor y transmisor (Espinosa, 2008).

$$\text{Pr}(d) = \frac{P_t * G_t * G_r * \lambda^2}{(4\pi)^2 * d^2 * L} \quad (2.6)$$

Donde:

P_t : Potencia de la señal transmitida.

G_t, G_r : Ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente.

$L(L \geq 1)$: Pérdida del sistema.

λ : Longitud de onda

Este modelo representa el rango de comunicaciones como un círculo alrededor del transmisor. Es común en este modelo que $G_t = G_r = 1$ y $L = 1$, en el simulador NS.

Modelo de reflexión de los dos rayos

Este modelo de propagación considera que la comunicación entre transmisor y receptor se basa en dos rayos, el principal es la línea de vista entre ambos dispositivos y el segundo es el que se produce por la reflexión en el suelo. Este modelo está más guiado a la realidad, ya que considera las reflexiones que se producen a mayores distancias.

La potencia recibida en el emisor a una distancia d se la calcula de la siguiente forma:

$$\text{Pr}(d) = \frac{P_t * G_t * G_r * h_t^2 * h_r^2}{d^4 * L} \quad (2.7)$$

Donde:

h_t, h_r : Son las alturas de las antenas de transmisión y recepción respectivamente.

Esta ecuación nos indica que la potencia de recepción decrece mientras mayor es la distancia. No es recomendable utilizar este modelo de propagación en

distancias cortas por la combinación del efecto constructivo y destructivo de los dos rayos. En la distancia de cruce, los dos modelos anteriores generan el mismo resultado, por lo tanto, la distancia de cruce se calcula de la siguiente manera:

$$d_c = \frac{4\pi \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda} \quad (2.8)$$

Teniendo en cuenta que esta expresión nos obliga a conocer, las dos alturas de las antenas y la longitud de onda de la señal.

Modelo Shadowing

Los modelos anteriores tanto como el de espacio libre y de los dos rayos, estiman la potencia de la señal recibida en función a la distancias de separación entre el transmisor y receptor. Estos modelos asumen que el rango de cobertura en un círculo. Lo que en la realidad la potencia de la señal es una variante aleatoria debido a los efectos de multi-camino, llamado efecto de desvanecimiento. El modelo de propagación sombra o shadowing, considera dos partes (Espinosa, 2008).

1.- Es conocida como el modelo de propagación de pérdidas de trayectoria (path loss model), La cual da una estimación de la potencia media de la señal recibida a una distancia d , anotada como $Pr_m(d)$. Utiliza una distancia de referencia inicial d_0 . La potencia $Pr_m(d)$ se calcula relativa a $Pr(d_0)$ de la siguiente manera

$$\frac{Pr(d_0)}{Pr_m(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\beta \quad (2.9)$$

Donde:

β : Es el exponente de la pérdida de trayectoria, es un valor experimental, que se lo obtuvo por mediciones de campo. En la ecuación del modelo de espacio

libre, se deduce un valor $\beta=2$, en la siguiente tabla se dan algunos valores típicos de β . Los valores altos representan obstáculos mayores, por lo que la potencia de la señal de recepción disminuye en cuanto la distancia crece.

La pérdida de trayectoria se calcula usualmente en dB de la siguiente manera:

$$\left(\frac{Pr(d_0)}{Prm(d)}\right)_{dB} = -10 * \beta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.10)$$

Tabla. 7. Valores típicos del exponente β .

AMBIENTE		B
AL AIRE LIBRE	Espacio Libre	2
	Shadows urban area	2.7 - 5
CONSTRUCCIONES	Linea de visión	1.6 - 1.8
	Obstáculos	04-jun

2.- La segunda refleja la variación de la potencia de la señal de recepción en función a la distancia. Es una función aleatoria log-normal, Lo que quiere decir que es una distribución Gaussiana en dB. La ecuación sería de la siguiente forma.

$$\left(\frac{Pr(d_0)}{Prm(d)}\right)_{dB} = -10 * \beta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (2.11)$$

Donde X_{dB} es una variable aleatoria Gaussiana con una media de cero y una desviación estándar σ_{dB} denominada desviación shadowing y se obtiene también de mediciones experimentales. Esta ecuación también se la conoce como modelo log-normal shadowing.

La Tabla.8, muestra algunos valores típicos de dicha desviación algunos valores típicos de dicha desviación (Espinosa, 2008).

Tabla. 8. Valores típicos de la desviación shadowing.

AMBIENTE	(σ)dB
AL AIRE LIBRE	4 – 12
Office, hard partition	7
Office, soft partition	9.6
factory, Linea de vista	3 – 6
factory, Obstaculos	6.8

La Tabla.8, muestra los valores de desviación shadowing, para diferentes entornos de propagación que se ajustan a las condiciones reales de un escenario. Pero se tiene que tomar en cuenta que para distancias cortas los modelos de propagación de los dos rayos y shadowing, producen los mismos resultados en el simulador, por lo explicado anteriormente.

2.7.5 Protocolos de encaminamiento

En las redes multi-salto, los nodos intermedios son los encargados de enviar paquetes desde el nodo fuente al nodo destino. Por lo que estos nodos tienen que decidir cuál camino es el mejor para enviar estos paquetes. Normalmente, estos nodos se ayudan con las tablas de ruteo quienes mantienen una lista actual de los vecinos y su camino más apropiado. La construcción, mantenimiento y actualización de estas tablas son de suma importancia para los protocolos de ruteo distribuido.

La dificultad es el trazar una ruta entre un nodo y otro, esto se lo puede analizar bajo diferentes aspectos. El aspecto más simple es la conexión física de los nodos. En una red que posee infraestructura se resuelve este dilema de forma centralizada a través de matriz de conectividad. Esta matriz varía con el tiempo debido a los cambios que se producen en el canal inalámbrico por efectos desvanecimientos e interferencias, o que pueden ser nodos móviles. Otros factores

son la eficiencia energética, patrones de movimiento y escalabilidad (Espinosa, 2008).

En una red de sensores inalámbricos, el tema de la energía es muy importante ya que está ligada al tiempo de vida funcional de la red, también está la calidad de datos que se envían. Los protocolos se clasifican en:

- ✓ Proactivos: están basados en tablas, son poco eficientes ya que generan nuevas tablas constantemente y consumen ancho de banda. Son los siguientes: DSDV (Destination – Sequenced Distance – Vector Routing Protocol), CGSR (Clusterhead Gateway Switch Routing), WRP (Wireless Routing Protocol), OLSR (Optimized Link State Routing) y TBRPF (Topology Dissemination Based on Reverse – Path Forwarding).

- ✓ Reactivos: el encaminamiento se fundamenta en base a la demanda, o sea que si no hay rutas libres, entonces las construyen. Los protocolos más utilizados son: AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing), DSR (Dynamic Source Routing), LQSR (Link Quality Source Routing Protocol), LMR (Lightweight Mobile Routing) y TORA (Temporary Ordered Routing Algorithm).

- ✓ Orientado flujo: cuando los nodos determinan el siguiente salto

- ✓ Adaptivos: el ruteo se adapta a la situación.

- ✓ Híbridos: pueden ser proactivos y reactivos.

- ✓ Jerárquicos: los protocolos tienen jerarquías dentro de la red y los nodos forman agrupaciones con identificaciones específicas para ser o no sumideros.

- ✓ Geográficos: solo conocen la posición de los nodos inmediatos independientemente del resto de la red. Se tiene GSPR (Greedy Perimeter).

El simulador de redes NS trabaja con los siguientes protocolos: DSDV, AODV y DSR (Espinosa, 2008) (UC Berkeley LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, 2010).

Protocolo DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol)

Es un protocolo de vector distancia que utiliza una variación del algoritmo de encaminamiento Vector Distancia Bellman-Ford utilizado en redes fijas, como el protocolo RIP. El trabajo de este protocolo, es intercambiar periódicamente las tablas de ruteo de los nodos con sus vecinos, así tener cuales son los nodos vecinos y los alejados. Este protocolo proporciona rutas sin bucles debido a la utilización de números de secuencia para la determinación de nuevas rutas. DSDV proporciona un único camino hacia su destino, siempre elige el camino más corto en base al menor número de saltos hacia el destino.

Protocolo AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector)

Es un protocolo de vector distancia cuya métrica se basa en el número de saltos, se activa únicamente cuando se necesita enviar paquetes, es decir bajo demanda. Los nodos poseen una tabla de ruteo para los destinos conocidos utilizando el algoritmo de vector distancia. Esta tabla se forma con los nodos vecinos donde se van añadiendo nuevos según sea necesario, esto es cuando se quiere comunicar con un nodo que no esté en la tabla, a través del descubrimiento de nuevas rutas hacia el destino. Para que esto sea posible, se emiten paquetes de descubrimiento de rutas RREQ (Route Request) que contiene información tanto del nodo origen como del nodo destino, un número de secuencia del origen y un contador de saltos. Este mensaje se lo difunde de forma de broadcast a todos los nodos de la red, pero solo existirá una respuesta RREP (Route Reply), puede ser del nodo destino u otro nodo que conozca la ruta correcta hacia el destino. Cuando el nodo origen receipta varios RREP, este analiza cuál de estos tiene el menor número de saltos y lo establece como ruta. Si por otro lado este no recibe ninguna respuesta, en nodo origen reenvía su petición incrementando el número de

secuencia para no ser desatendido. Las rutas descubiertas se mantienen por un determinado tiempo a fin de evitar que no existan caminos incorrectos producidos por el movimiento de alguno de los nodos (Espinosa, 2008).

La ventaja de este protocolo es que puede reparar daños en la red, como cuando un nodo vecino detecta que el enlace está roto, este tratará de descubrir nuevas rutas hacia el nodo con el cual se perdió el enlace.

Protocolo DSR (Dynamic Source Routing)

Se trata de un protocolo de fuente dinámica orientado a redes de gran cantidad de nodos (algunos cientos) móviles. Este protocolo basa su funcionamiento desde el origen, esto quiere decir, que los paquetes incluyen una cabecera con la información exacta de los nodos que deben atravesarla. No requiere ningún tipo de mensajes periódicos, con esto se logra disminuir la sobrecarga con mensajes de control. En la solicitud de una ruta, se ofrece múltiples caminos posibles hacia el destino. El ruteo se lo hace en el origen insertando una cabecera en el paquete de datos, esta cabecera es colocada en la capa de transporte y la IP, y la ruta que se va a seguir el paquete de nodo a nodo. Las rutas se almacenan en una memoria cache, porque puede haber descubrimiento de rutas propias o de escuchas en la red.

2.7.6 Simulación de la WSN mediante NS2

Una vez analizadas las topologías existentes se definirá la topología que mejor se adapte para la aplicación de monitoreo de puentes, ya que con ello se facilita considerablemente la interpretación de los resultados y tener una conexión homogénea entre los nodos de la red. Por otro lado, para realizar las pruebas del desempeño de la red, es importante definir algunos parámetros que indican el tipo de red con sus distintas características.

Esto es, el canal de comunicación, el modelo de propagación, el tipo de interfaz de la red, la capa MAC, el tipo de cola, el tipo de antena, el protocolo de enrutamiento. La topología seleccionada como patrón de red es la de estrella, esto se debe a que esta topología ofrece una facilidad en la detección de fallos.

Por otro lado, para que la simulación tenga un enfoque a una ambiente real, seleccionamos el puente “SAN PEDRO” que tiene una longitud aproximada de 150,27 m, se encuentra en el sector del valle de los Chillos, cerca del colegio Farina, la estación encargada del monitoreo de la salud de esta estructura está conformada por un total de 7 nodos sensores inalámbricos y un nodo coordinador, distribuidos de forma que cubran el área del puente.

La topología de la red de sensores inalámbricos es fija, el nodo 0 va hacer el nodo que funciona como Gateway (sumidero) y como nodo coordinador, de toda la información recopilada por todos los sensores de la estación de monitoreo. Los demás nodos recolectaran la información de las vibraciones que se producen en el puente por el paso de vehículos.

El nodo 0 se conecta inalámbricamente con los demás nodos sensores y a su vez se halla conectada a un equipo de radio en 2.4GHz; este equipo se conecta con otros similares y para depositan toda su información en la central de monitoreo, para su posterior procesamiento de la información recolectada por los nodos sensores.

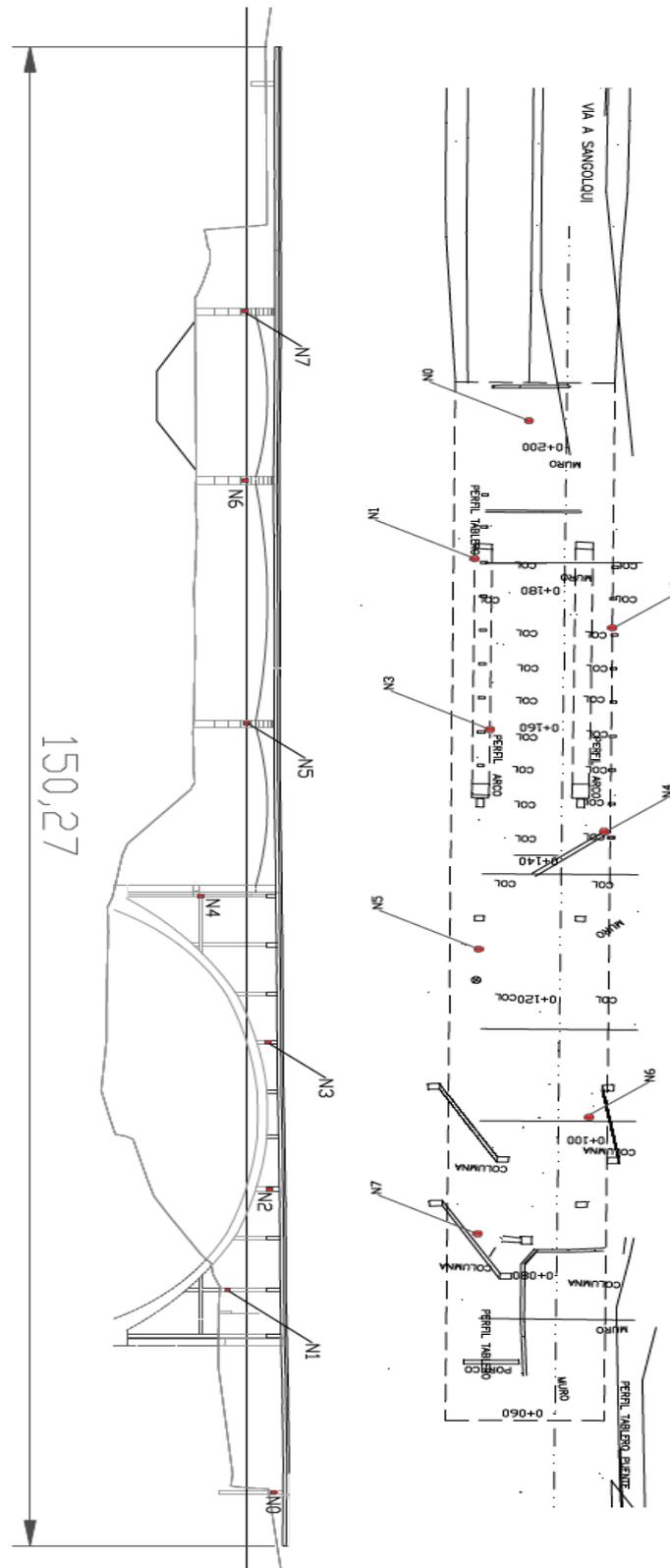


Figura. 28. Red de sensores de la estación de monitoreo (Espinosa, 2008).

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UNA ARQUITECTURA BASADA EN WSN PARA EL MONITOREO DE ESTRUCTURAS DE PUENTES (MARTINEZ, 2009)

El diseño de la red de monitoreo contempla varios aspectos importantes como un análisis del presupuesto del enlace, la disponibilidad y calidad del sistema, lo que implica hacer un correcto estudio sobre la planificación del radioenlace, esto es examinar mapas topográficos del entorno, trazado de perfiles, realizar caculos del radioenlace, que incluye la potencia de la señal y ruido, umbrales, márgenes, desvanecimientos, perdidas del espacio libre, perdidas de reflexión y difracción, para poder establecer la conectividad de la red. Con este proceso podemos conocer si la señal de recepción, y los equipos seleccionados son los más adecuados.

Con el cálculo del desempeño del enlace, se obtiene un balance entre las características de los medios de propagación y factores condicionantes de los equipos, con lo cual se puede determinar la calidad de la señal, el funcionamiento y el rendimiento del enlace.

La siguiente figura muestra los elementos que intervienen para el análisis de un radio enlace.

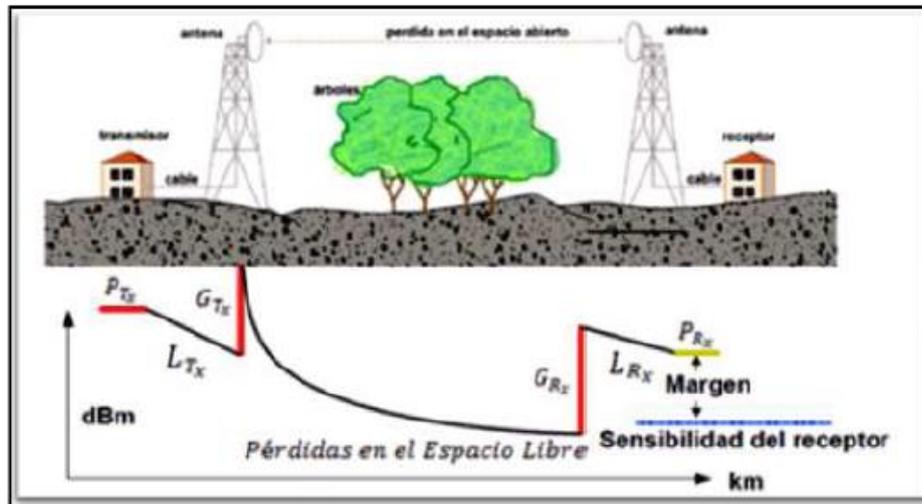


Figura. 29. Entorno de despliegue de la red de monitoreo.

Dónde:

- ✓ P_{TX} [dBm] → Potencia del Transmisor
- ✓ L_{TX} [dB] → Perdidas del cable del Transmisor
- ✓ G_{TX} [dBi] → Ganancia Antena del Transmisor
- ✓ A_{Le} [dBi] → Perdidas por Espacio Libre
- ✓ G_{RX} [dBi] → Ganancia Antena Receptor
- ✓ Margen, Sensibilidad del Receptor

3.1 Planificación de la red

La planificación empieza por analizar el entorno de despliegue de la red que estará implementada en el puente “SAN PEDRO”, situado en el ingreso al Valle de los Chilllos, a unos metros del Colegio Farina, en la provincia de Pichincha. Se definió una estación general encargada del monitoreo de las vibraciones que presenta el puente. Una vez definido la estación de monitoreo se define el tipo de topología de la red de sensores que serán colocados en el puente, conformando

una serie de medidas que nos permitirán conocer el estado de la salud de la estructura.

3.2 Entorno de despliegue (EDWIN PATRICIO AMAGUAÑA DÁVILA, TATIANA MAGALI APOLO CÁRDENAS , 2009)

Para el escenario que se desplegara la red de monitoreo, se eligió el puente del ingreso al Valle de los Chillos por la avenida General Rumiñahui, en la provincia de Pichincha, como indica la siguiente figura.

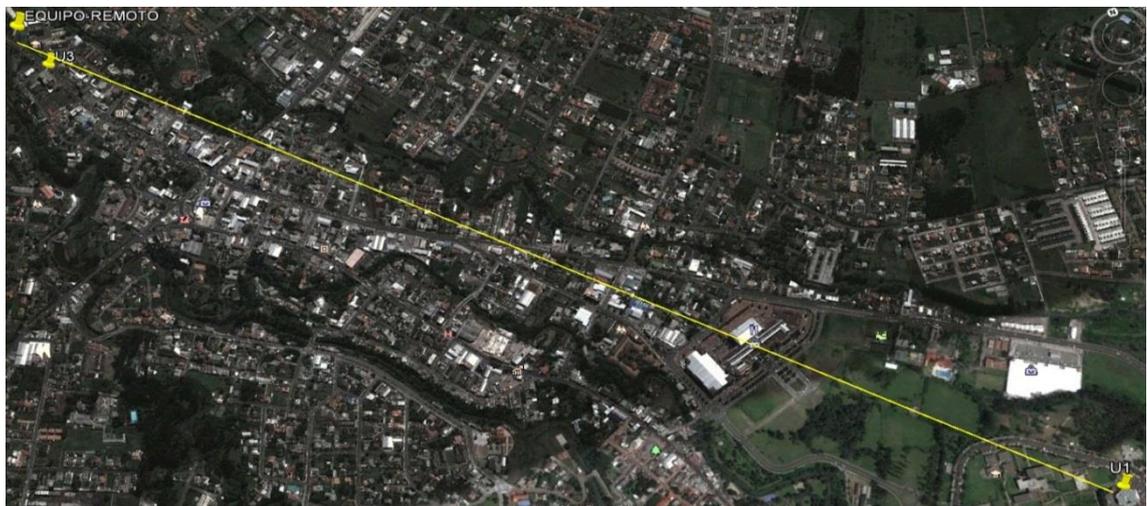


Figura. 30. Entorno de despliegue de la red de monitoreo.



Figura. 31. Punto de monitoreo, puente Santa Pedro, Quito.

La Figura.30, muestra los puntos escogidos para la estación de monitoreo, repetidor y el nodo principal de la red de telecomunicaciones.

La estación de monitoreo, el repetidor y el nodo central se muestran a continuación:

✓ ESTACION DE MONITOREO: MONITOREO. U2. Este sitio de monitoreo está conformado por un grupo de sensores que son los encargados de recopilar información de las vibraciones que se producen en el puente.

✓ REPETIDORAS: U3. existe una estación repetidora.

✓ RECOLECCIÓN CENTRAL: El gateway de toda la información recolectada es U1 correspondiente a la Escuela Politécnica del Ejército donde se procederá a realizar el procesamiento de la información recolectada.

En la Tabla.9, indican las coordenadas de los sitios designados para la red de monitoreo. Existen un punto de monitoreo, un nodo central y un punto designado para el repetidor.

Tabla. 9. Ubicaciones de cada estación de monitoreo y repetidora.

Lugar	No.	Tipo	ESTRUCTURA			
			ALTUR A m (s.n.m.)	ALTUR A m	COORDENADAS (WGS-84)	
					Latitud	Longitud
DEEE- ESPE	1	Arriostrada s	2495	20	00°18'49.92" S	78°26'37.58" W
REPETIDO R	2	Arriostrada s	3948	20	00°17'44.86" S	78°27'43.35" W
MONITORE O	3	Arriostrada s	680	20	00°17'40,37" S	78°27'44.86" W

Para el análisis y evaluación de los emplazamientos propuestos en esta red de monitoreo, se utilizará la aplicación Radio Mobile versión 10.6.7.

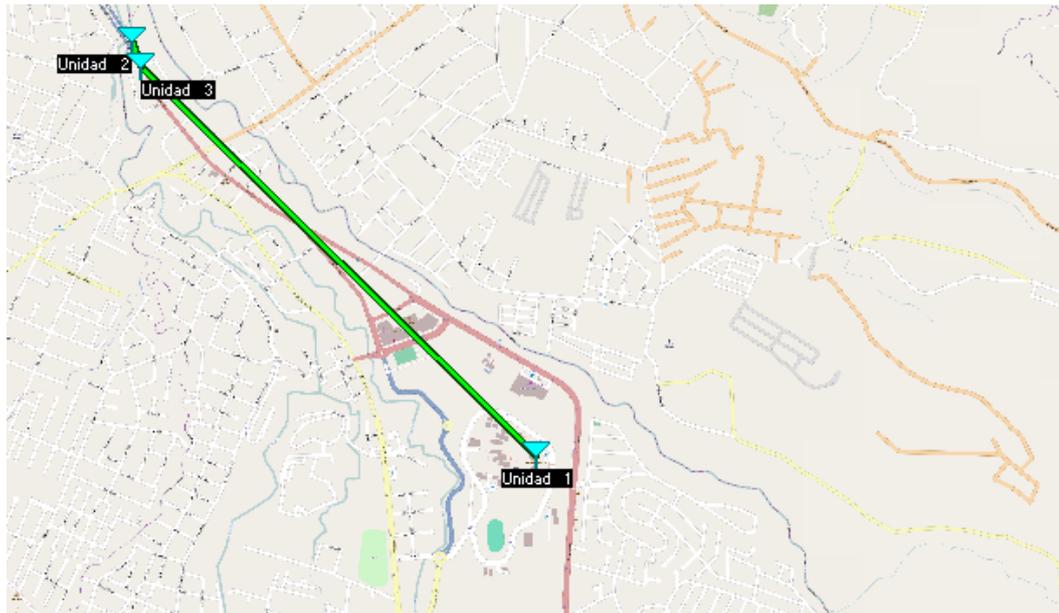


Figura. 32. Despliegue de la red de monitoreo utilizando Radio Mobile.

La Figura.32, se muestra la red desplegada. Se observa que existen dos puntos principales, el punto de monitoreo que es en donde se capta las variables por los sensores, y la estación base de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, donde se hará el procesamiento y análisis de la información. La red de monitoreo está formada por dos partes la primera es el sector de monitoreo del puente con una distancia lineal de 150,27 m, y la segunda es la red de transporte con una distancia aproximada 3,50 km. Es necesario por lo tanto la utilización de un repetidor y un amplificador de RF para alcanzar dicha distancia que normalmente no se alcanzarían con los sensores y su escasa potencias.

3.3 Esquema general de la red (EDWIN PATRICIO AMAGUAÑA DÁVILA, TATIANA MAGALI APOLO CÁRDENAS , 2009)

La siguiente Figura.33, nos da un esquema general de la red de monitoreo de las variables que se producen en estructuras de puentes, Las estación de monitoreo, el repetidor, y la estación base que hace como gateway de toda la información recopilada.

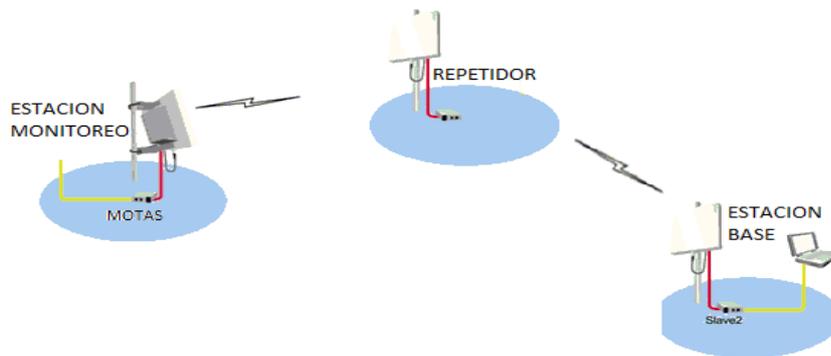
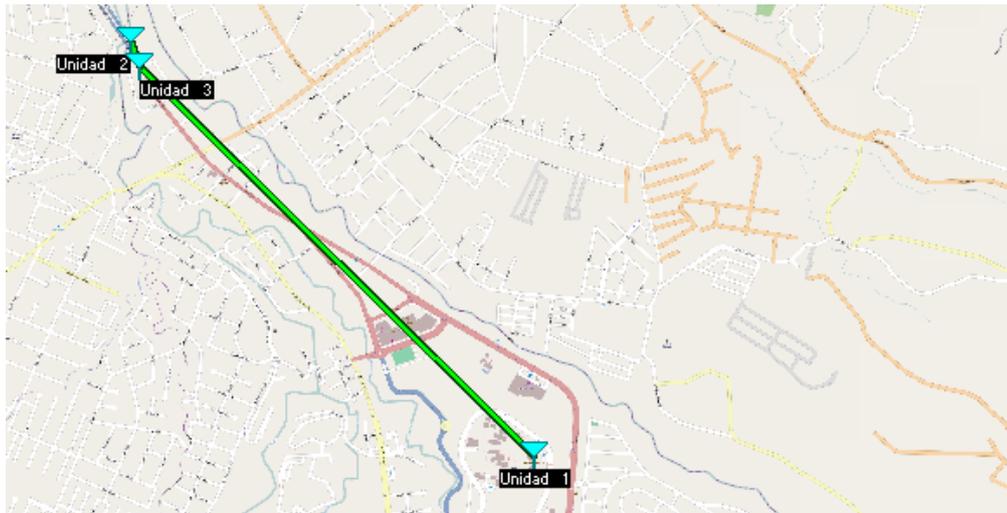


Figura. 33. Despliegue general de la red de monitoreo.

Los equipos que conforman la estaciones de monitoreo se muestran en la Figura.



Figura. 34. Dispositivos de sensores inalámbricos Crossbow para sensar vibraciones.

Se debe considerar que la estructura del puente donde se quiere instalar los sensores tienen forma irregular, lo que quiere decir que las señales de propagación se verán afectadas, al no tener línea de vista, ya que existen obstáculos que forman la estructura.

Estos factores hay que tenerlos presentes en la elección del canal de propagación dentro del simulador NS2, ya que no existe línea de vista

En la Figura.35, describe un esquema general que indica la forma de conectar los componentes del sistema de medición de vibraciones de un puente, la recolección inalámbrica de datos, el interface a la PC y la conexión al Ruteador para su transmisión a los puntos de repetición.

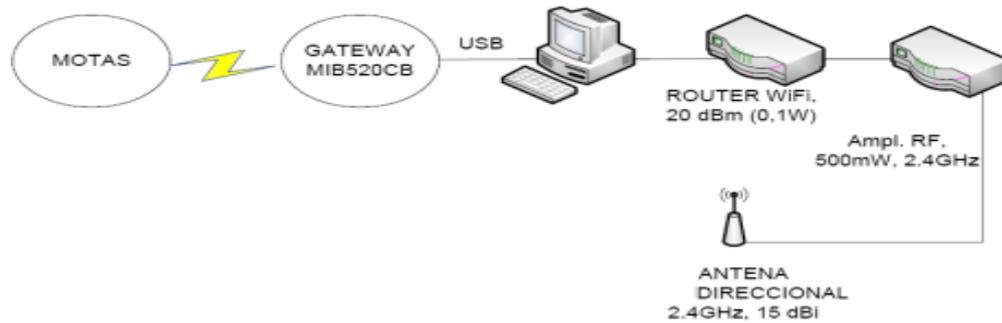


Figura. 35. Conexión de los equipos de medición y transmisión inalámbrica.

La Figura.35, nos presenta los componentes que intervienen dentro de una red de sensores de monitoreo, donde se requiere un amplificador de 2.4GHz, con una potencia básica de 500 mW max de salida, lo que nos ayuda a tener una mejor cobertura

Las estaciones repetidoras están compuestas por un router, un amplificador de FR y una antena direccional.

La Tabla.10, muestra las especificaciones básicas del amplificador de radiofrecuencia donde se puede observar su frecuencia de trabajo de 2.4 GHz a 2.5 GHz, ganancia de transmisión de 17 dB, ganancia de recepción de 15 dB y potencia de salida de 500 mW que se ajustan a las necesidades del sistema de comunicaciones.

Tabla. 10. Datos de especificaciones del amplificador RF.

ESPECIFICACION TECNICA DE UN AMP RF	
Características	802.11g 500Mw Outdoor
Rango-Operación	2400-2500 MHz
Modo-Operación	Bi-direccional-TDD
Ganancia-Tx	17dB
Resp-Frecuencia	+/-1 dB
Potencia-Salida	500 mW (+27 dBm)
Potencia-Tx-input	10 dBm
Ganancia-Rx	15 dB típica
Ruido	3.5 dB típica
Conectores	Tipo-N, Hembra, 50 Ohms
Consumo-Potencia	Tx=1.2A, Rx=130mA @9VDC

3.4 Red de transporte

Está compuesta por un 3 sistemas de transmisión y recepción de datos que operan en la frecuencia de 2.4 GHz. De estos sistemas, uno es el que corresponde a la estación de monitoreo de las vibraciones producidas en el puente, una estación repetidora, y una estación para la recopilación total de la información generada para su posterior tratamiento conformando una base de datos.

Una vez establecidos los 3 puntos de localización de las distintas estaciones, es necesario realizar un estudio de propagación para analizar la calidad de cada radioenlace mediante una herramienta de software.

3.4.1 Estudio de propagación con Radio Mobile (Grupo de Radiocomunicación, Departamento SSR, 2007)

Para el estudio de propagación se considerarán factores como la ubicación de cada uno de los nodos ya sea el de monitoreo, el repetidor, y la estación de recolección de información, la reglamentación local y nacional para sistemas de comunicaciones fijos y móviles en 2.4 GHz, modelos estadísticos de propagación, etc.

Las ubicaciones de cada una de las estaciones de monitoreo, control y repetidora, se han elegido de tal manera nuestra red de datos sea un enlace eficiente y de bajo costo.

El objetivo es planificar una red inalámbrica que conecte el puente de SAN PEDRO, que se localiza al ingreso del Valle de los chillos, que se desea monitorear, al ser una estructura la cual presenta una fuerte vibración, y el centro de procesamiento de datos que estará ubicado en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, en la provincia de Pichincha utilizando sensores inalámbricos que trabajen con el estándar IEEE 802.15.4.

3.4.2 Especificaciones a considerarse en Radio Mobile (Grupo de Radiocomunicación, Departamento SSR, 2007)

Se han considerado las siguientes especificaciones:

- ✓ La frecuencia de operación de halla entre 2.4 GHz a 2.483 GHz.
- ✓ Modo estadístico: difusión
- ✓ Requisito de variabilidad: 90% del tiempo, 90% de las localizaciones, 80% del resto de las situaciones.
- ✓ Parámetros del suelo: por defecto.
- ✓ Pérdidas adicionales: ninguna.

- ✓ Estilo de la presentación: enlace verde si la señal relativa es mayor que 15 dB, amarillo si es mayor que 5 dB y rojo por debajo de 5 dB.
- ✓ Utilizar LandCover para mejorar el modelado de las características del suelo.

Con respecto a la potencia de transmisión en la banda de 2.4 GHz y las ganancias de las antenas, la legislación ecuatoriana a través del Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) en la Normativa 34 Norma para la Implementación y operación de sistemas de modulación digital de banda ancha, en el Anexo 1, ítem i) indica lo siguiente: “Si la ganancia de la antena direccional exclusivamente en los sistemas fijos punto-punto y que operan en la banda 2400-2483.5 MHz es superior a 6 dBi, deberá reducirse la potencia máxima de salida del transmisor, esto es 1W, en 1 dB por cada 3 dB de ganancia de la antena que exceda los 6 dBi ”[20].

Para nuestra red de monitoreo utilizamos antenas direccionales de 15 dBi, lo que excede en 9dB a las 6 dBi permitidos. Para compensar esto debemos reducir la potencia del transmisor de 30 dBm lo que equivale a 1 W, a lo siguiente: $30 \text{ dB} - (9/3) \text{ dB} = 27 \text{ dBm}$.

Para las simulaciones siguientes se utilizará una potencia del transmisor de 27 dBm, así de esta manera estaremos respetando las normativas de regulación.

Para el estudio de propagación utilizando Radio Mobile, se ha configurado la herramienta en base a las especificaciones descritas en este mismo apartado. La consideración de potencia relativa de 15 dB puede resultar exigente, pero considerando que la zona de trabajo es la región con temperaturas que pueden cambiar entre 10 grados y 23 grados a lo largo del año, este valor de 15 dB nos da un margen favorable frente a las variaciones de la temperatura fundamentalmente.

Al considerar el valor más bajo de sensibilidad de los equipos en -104 dBm, se espera obtener comunicación en los radio enlaces, aunque éstos sean a la velocidad más baja.

Es importante saber que al tratarse de que la aplicación es para mediciones de vibraciones en un puente, no es tan importante su velocidad, más bien la certeza de sus mediciones.

A continuación se presentan los resultados del análisis de los radioenlaces en base a Radio Mobile.

Enlace Unidad 2 (Monitoreo) y Unidad 3 (Repetidor)

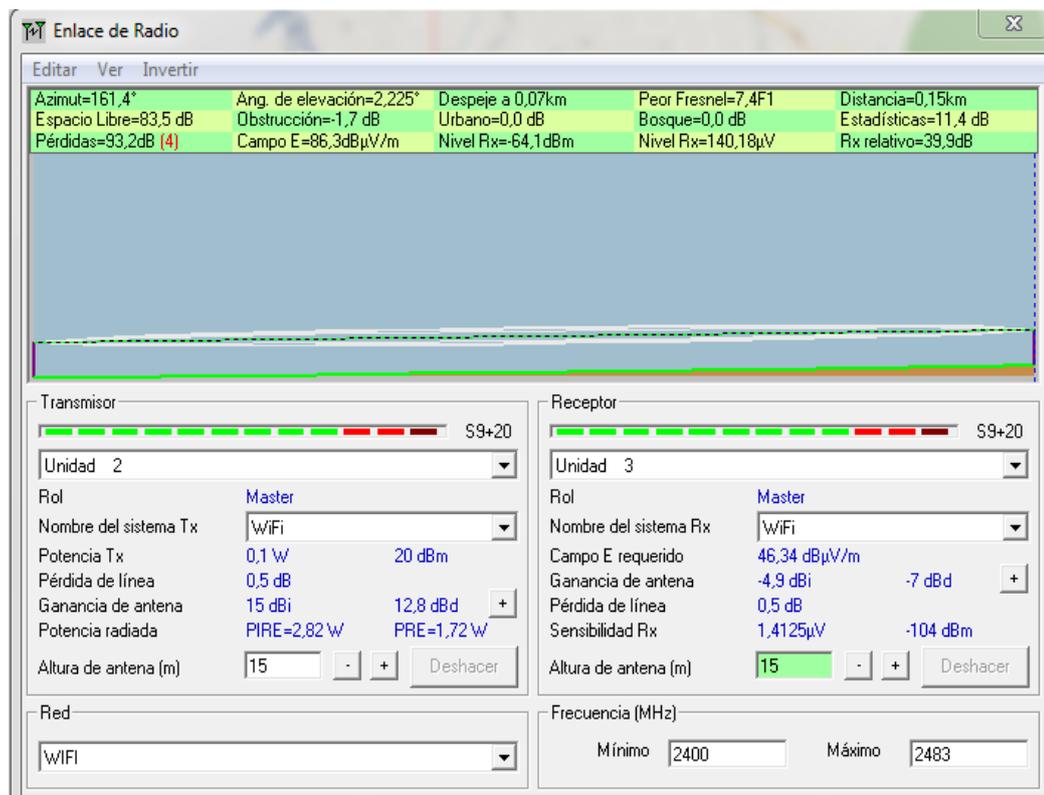


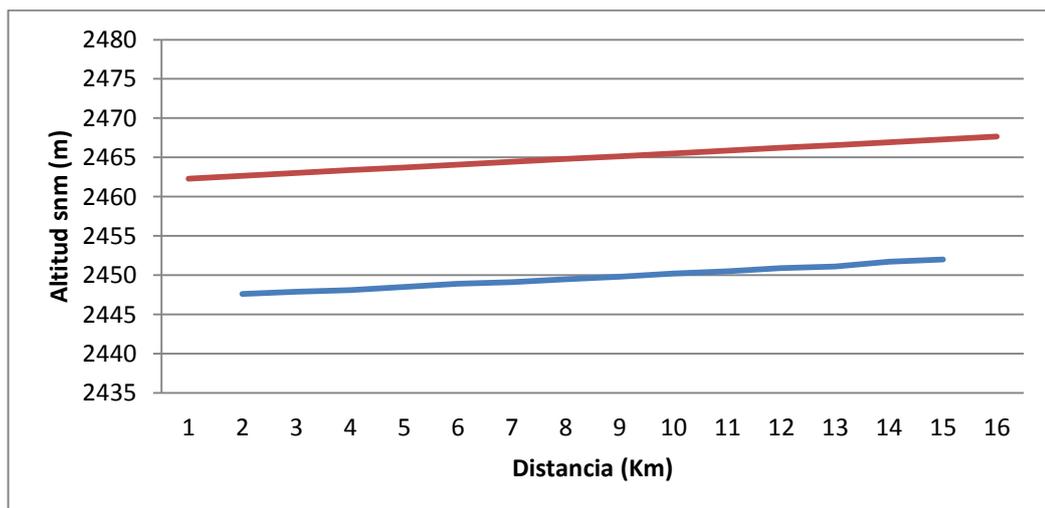
Figura. 36. Enlace Monitoreo a Repetidor.

Gracias a las facilidades del software se pudieron obtener las alturas del perfil del trayecto para un valor de 4/3 como indica la tabla

Tabla. 11. Perfil Monitoreo-Repetidor.

Altitud (m)	Distancia (Km)
	0
2447,6	0,02
2447,9	0,03
2448,1	0,04
2448,5	0,05
2448,9	0,055
2449,1	0,06
2449,5	0,07
2449,8	0,08
2450,2	0,09
2450,5	0,1
2450,9	0,11
2451,1	0,12
2451,7	0,13
2452	0,14
	0,15

A continuación se muestra la gráfica con los resultados obtenidos.

**Figura. 37. Perfil del enlace Monitoreo-Repetidor.**

En la Figura.37, La línea de color rojo representa el trayecto entre transmisor y receptor incluido las alturas de las antenas, mientras que la línea azul es el perfil del terreno.

Desarrollo de los cálculos para el primer enlace (CARDENAS, 2011)

En este apartado se describe el procedimiento para el cálculo del desempeño del primer enlace, basado en el Modelo de Majoli.

A continuación se muestra las características de los equipos a usarse y del perfil del terreno, como la posición, distancias de las antenas y de los obstáculos, los cuales fueron sacados de la herramienta de Radio Mobile.

Tabla. 12. Características del enlace.

DATOS	
Potencia de Transmisión	100 [mW]
Frecuencia de Operación	2,4 [GHz]
Umbral de recepción	-97 [dBm]
Ganancia de las Antenas G _{tx} =G _{rx}	15 [dBi]
Altura de la antena de Tx	15 [m]
altura de la antena de Rx	15 [m]
Perdidas por línea de Transmisión	0,40622 [dB/m]
Modulación	64 QAM
VER	10e-3

Tabla. 13. Características del Terreno.

	DISTANCIA [Km]	ALTURA [m]
Transmisor	0	2447,3
Receptor	0,15	2453
Obstáculo	0,3	2451,1

Una vez conocidos los valores se procede a calcular el margen sobre el obstáculo aplicando la siguiente ecuación.

$$c = h_1 + \frac{d_1 * (h_2 - h_1)}{d} - h_{obs} \quad (3.1)$$

$$c = 2462,3 + \frac{(0,15 - 0,03) * (2468 - 2462,3)}{0,15} - 2451,1$$

$$c = 15,76$$

El valor de c es correcto, ya que es positivo, porque el haz está por encima de del obstáculo.

Calculo para la primera zona de Fresnel se utiliza la siguiente expresión.

$$F1 = 548 * \sqrt{\frac{d_1 * d_2}{f * d}} \quad (3.2)$$

$$F1 = 548 * \sqrt{\frac{(0,15 - 0,03) * 0,03}{2400 * 0,15}}$$

$$F1 = 17,33$$

El porcentaje de liberación de la primera zona de Fresnel se lo hace de la siguiente forma:

$$\frac{c}{F1\%} = \frac{15,76}{17,33} * 100\%$$

$$\frac{c}{F1\%} = 90,94\%$$

Por lo que el enlace cumple con el 60% de libertad de la primera zona de Fresnel.

Comprobación:

$$60\% * F1 = 17,33 * 0,6$$

$$60\% * F1 = 10,398$$

$$c = 15,76$$

$$c > 10,398 \quad \text{Por lo que } c > 60\% * F1$$

Cálculo de las pérdidas debido al espacio libre se realizó utilizando la siguiente expresión.

$$A_{Le}(dB) = 32.45 + 20 \log[f(MHz)] + 20 \log[d(Km)] \quad (3.3)$$

$$A_{Le}(dB) = 32.45 + 20 \log[2400] + 20 \log[0,15]$$

$$A_{Le} = 83,57[dB]$$

Para conocer las pérdidas de las líneas de líneas se calculan utilizando la ecuación:

$$L_{Tx} = L_{LTx} * h_{antena} \quad (3.4)$$

$$L_{Tx} = (0,40622 * 2) + (0,40622 * 2)$$

$$L_{Tx} = 1,625 [dB]$$

Cálculo del margen de desvanecimiento se lo realiza con la ecuación:

$$M = P_{Rx} - Umbral \quad (3.5)$$

Donde P_{Rx} se define en la ecuación:

$$P_{Rx}[dB] = P_{Tx}[dB] + G_{Tx}[dBi] + G_{Rx}[dBi] - L_{ALIMENT} - L_{Tx} - L_{TOTALES} \quad (3.6)$$

$$P_{Rx}[dB] = 10 \log\left(\frac{100 * 10^{-3}}{1 * 10^{-3}}\right) + 15 + 15 - 13,32 - 83,57 - 1,625$$

$$P_{Rx}[dB] = -61,835 [dB]$$

Por lo que:

$$M = -61,835 - (-97)$$

$$M = 35,165 \text{ [dB]}$$

Enlace Unidad3 (Repetidor) y Unidad 1 (Estación Base)

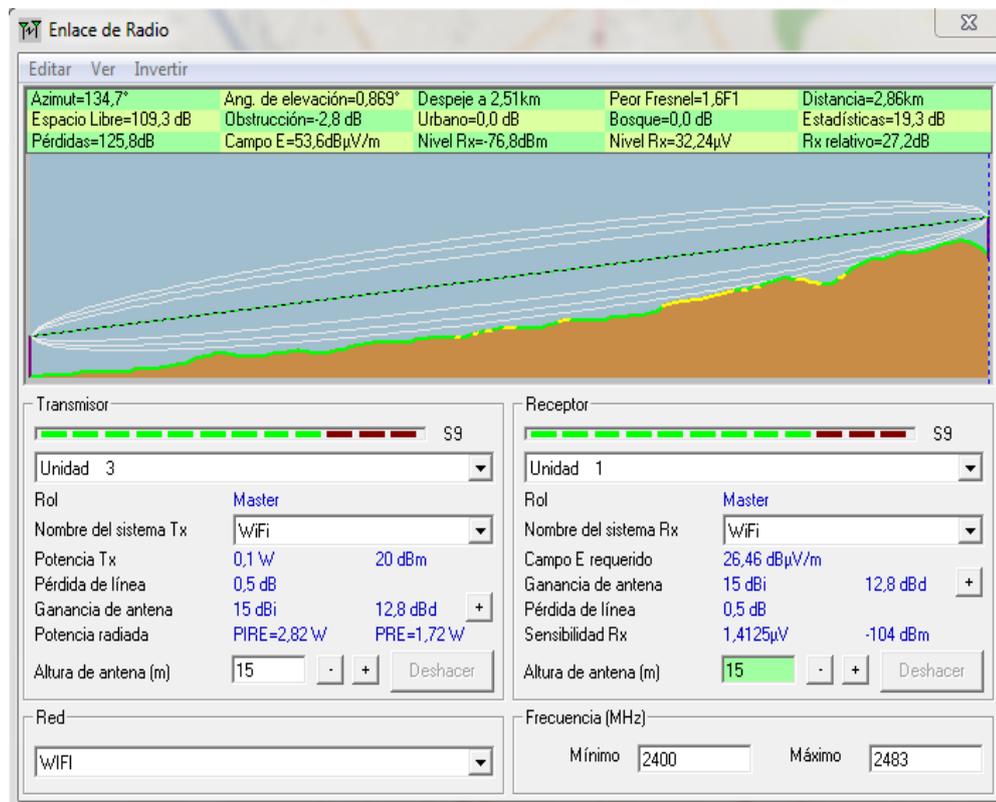


Figura. 38. Repetidor a Estación Base.

Una de las ventajas del software, nos permite obtener las alturas del perfil del trayecto para un valor de 4/3 como indica la tabla

Tabla. 14. Perfil Repetidor-Estación Central.

Altitud (m)	Distancia (Km)	2466	1.09	2503.9	2.78
	0	2468	1.2	2500	2.84
2454	0.04	2469.3	1.33		2.86

Continúa →

2454	0.11	2471	1.42
2455	0.16	2472	1.53
2455	0.18	2474	1.6
2455	0.2	2474	1.71
2455	0.22	2476	1.82
2455	0.24	2479.9	1.89
2456	0.33	2481.6	1.99
2457	0.4	2484.4	2.07
2460.7	0.51	2486.4	2.16
2462	0.59	2489.9	2.26
2461	0.67	2487.4	2.35
2462	0.75	2495.2	2.47
2462	0.85	2498.2	2.56
2464.6	0.96	2499	2.64

Una vez obtenidos los valores se puede realizar la gráfica que describe el perfil del terreno.

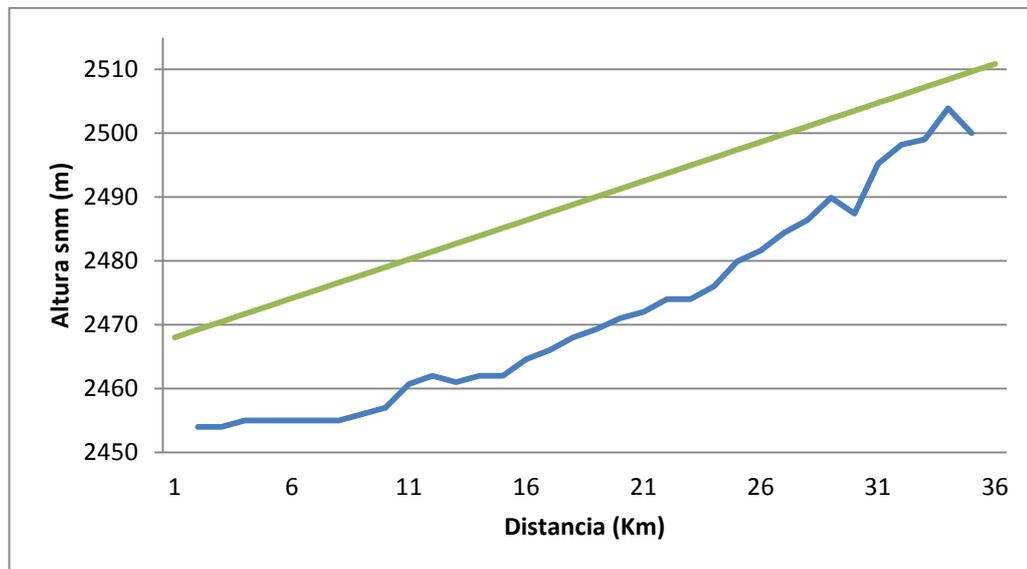


Figura. 39. Perfil del enlace Repetidor-Estación Base.

La Figura.39, tiene dos líneas, la verde la cual representa la trayectoria del haz del rayo electromagnético y la de color azul es el perfil del terreno.

Desarrollo de los cálculos para el segundo enlace (CARDENAS, 2011)

Para realizar el cálculo del desempeño de nuestro segundo vano, nos basamos en el modelo establecido por Mojoli.

Para esto se muestra en la Tabla.15, las características de los equipos a usarse y del perfil del terreno, como la posición de las antenas, las distancia de las antenas y del obstáculo, los cuales fueron sacados de la herramienta de Radio Mobile.

Tabla. 15. Características del enlace.

DATOS	
Potencia de Transmisión	100 [mW]
Frecuencia de Operación	2,4 [GHz]
Umbral de recepción	-97 [dBm]
Ganancia de las Antenas Gtx=Grx	15 [dBi]
Altura de la antena de Tx	15 [m]
altura de la antena de Rx	15 [m]
Perdidas por línea de Transmisión	0,40622 [dB/m]
Modulación	64 QAM
BER	10e-3

Tabla. 16. Características del Terreno.

	DISTANCIA [Km]	ALTURA [m]
Transmisor	0	2453
Receptor	2,86	2497,1
Obstáculo	0,3	2498,2

Una vez conocidos los valores se procede a calcular el margen sobre el obstáculo aplicando la ecuación:

$$c = h_1 + \frac{d_1 * (h_2 - h_1)}{d} - h_{obs}$$

$$c = 2468 + \frac{(2,86 - 0,3) * (2512,1 - 2468)}{2,86} - 2498,2$$

$$c = 9,274$$

El valor de c es correcto, ya que es positivo, porque el haz está por encima de del obstáculo.

El cálculo de la primera zona de Fresnel se lo realiza con la siguiente ecuación:

$$F1 = 548 * \sqrt{\frac{d1 * d2}{f * d}}$$

$$F1 = 548 * \sqrt{\frac{(2,86 - 0,3) * 0,3}{2400 * 2,86}}$$

$$F1 = 5,796$$

El porcentaje de liberación de la primera zona de Fresnel se lo hace de la siguiente forma:

$$\frac{c}{F1\%} = \frac{9,274}{5,7965} * 100\%$$

$$\frac{c}{F1\%} = 159,99\%$$

Por lo que el enlace cumple con el 60% de libertad de la primera zona de Fresnel. Comprobación:

$$60\% * F1 = 5,7965 * 0,6$$

$$60\% * F1 = 3,4779$$

$$c = 9,274$$

$$c > 3,4779 \quad \text{Por lo que } c > 60\% * F1$$

Cálculo de las pérdidas debido al espacio libre utilizando la siguiente expresión:

$$A_{Le}(dB) = 32.45 + 20 \log[f(MHz)] + 20 \log[d(Km)]$$

$$A_{Le}(dB) = 32.45 + 20 \log[2400] + 20 \log[2,86]$$

$$A_{Le} = 109,181[dB]$$

Las pérdidas de las líneas de líneas se calculan utilizando la ecuación:

$$L_{Tx} = L_{LTx} * h_{antena}$$

$$L_{Tx} = (0,40622 * 2) + (0,40622 * 2)$$

$$L_{Tx} = 1,625 [dB]$$

Cálculo del margen de desvanecimiento se lo realiza con la expresión:

$$M = P_{Rx} - Umbral$$

Donde P_{Rx} se define en la ecuación:

$$P_{Rx}[dB] = P_{Tx}[dB] + G_{Tx}[dBi] + G_{Rx}[dBi] - L_{ALIMENT} - L_{Tx} - L_{TOTALES}$$

$$P_{Rx}[dB] = 10 \log\left(\frac{100 * 10^{-3}}{1 * 10^{-3}}\right) + 15 + 15 - 17,277 - 109,1815 - 1,625$$

$$P_{Rx}[dB] = -78,0842 [dB]$$

Por lo que:

$$M = -78,0842 - (-97)$$

$$M = 18,9158 \text{ [dB]}$$

Los resultados obtenidos de los radio enlaces anteriores se muestran en la Tabla.17.

Tabla. 17. Cuadro resumen de los cálculos de propagación de la Red.

Item	Enlace	hTx, hRx	Distanci a Km	Peor Fresnel	CAMP O E dBuV/m	Prx Relativo dB	Nivel de Rx dBm
1	Monitoreo- Repetidor	15m,15m	0.15	7.4F1	86,36	39,90	- 64,10
2	Repetidor- Estación	15m;15m	2,86	1,6F1	53.60	27,20	- 76,80
GTx=GRx=15dBi							
PTx=20dBm							
Sensibilidad Receptor=-97 dBm							

La Tabla.17, es un resumen de los cálculos simulados por Radio Mobile donde se toman algunos parámetros como distancia (Km), alturas de las antenas transmisora y receptora (m), despejamiento de la primera zona de Fresnel, campo eléctrico (dBuV/m), potencia relativa de recepción (dB) y el nivel de potencia de recepción (dBm). La ganancia de las antenas en todos los enlaces es de 15 dBi, la potencia de los equipos de transmisión es de 20 dBm lo permitido para transmisiones en 2.4GHz en el Ecuador, y una sensibilidad en -97 dBm. Con el fin de hacer una comparación de los datos obtenidos con el simulador y los datos calculados, como se puede observar la potencia de recepción del simulador y las que fueron encontradas realizadas utilizando las ecuaciones tiene valores muy cercanos.

3.4.3 Cálculo de desvanecimientos

Para comprobar la calidad de los radioenlaces, es preciso evaluar la probabilidad de que se rebase una determinada profundidad de desvanecimiento F, dB. También es importante calcular la duración media de los desvanecimientos.

La Figura.33, muestra que el emplazamiento total de la red de telecomunicaciones cubre una distancia de aproximadamente 3,50 Km que va desde el puente de SAN PEDRO sector Valle de los Chillos hasta la Universidad De las Fuerzas Armadas-ESPE. Esto significa que las condiciones meteorológicas pueden ser muy cambiantes y pueden llegar a perjudicar los radioenlaces de esta red.

Para el cálculo de la probabilidad de rebasar un desvanecimiento profundo para el enlace Monitoreo-Repetidor, se utilizará la siguiente expresión.

$$P_{dp} = P_o * 10^{-M/10} \quad (3.7)$$

Donde:

$$P_o = k * Q * f * d^3$$

$$P_o = 2.1 * 10^{-5} * Q * 2,4 * (0,15)^3$$

$$P_o = 2.1 * 10^{-5} * S^{-1.3} * 2,4 * (0,15)^3$$

Para el cálculo de rugosidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(h_i - \bar{h})^2}{n}} ; h = \sum \frac{h_i}{n} \quad (3.8)$$

$$h = \frac{34509,6063}{14} = 2464,97187$$

$$S = \sqrt{\frac{13,60625}{14}}$$

$$S = 0,971875$$

El cálculo de la distribución de probabilidad se lo realiza con la expresión:

$$P_o = 2.1 * 10^{-5} * (0,9718)^{-1.3} * 2,4 * (0,15)^3$$

$$P_o = 1.76526 * 10^{-7}$$

Con estos valores se puede obtener el desvanecimiento plano:

$$P_{dp} = P_o * 10^{-M/10}$$

$$P_{dp} = 2.74716 * 10^{-9} * 10^{-35,165/10}$$

$$P_{dp} = 5,3741 * 10^{-11}\%$$

Para el cálculo de desvanecimiento selectivo utilizamos la expresión:

$$P_{ds} = 100 * \eta * 4.32 * k * \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right) \quad (3.9)$$

Probabilidad de desvanecimiento multi-trayecto:

$$\eta = 1 - e^{-0.2(P_o)^{3/4}} \quad (3.10)$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2(1,76526*10^{-7})^{3/4}}$$

$$\eta = 1,72240 * 10^{-6}$$

Cálculo del tiempo medio de retardo utilizando la ecuación:

$$\tau_m = 0.7 * \left(\frac{d}{50}\right)^{1.3} \quad [ns] \quad (3.11)$$

$$\tau_m = 0.7 * \left(\frac{0,15}{50}\right)^{1.3} \quad [ns]$$

$$\tau_m = 3,6758 * 10^{-4} \quad [ns]$$

Cálculo del periodo de símbolo.

$$\tau_s = 6 * \frac{1}{155,52 * 10^6} \quad [ns]$$

$$\tau_s = 38,580 \quad [ns]$$

Con los cálculos obtenidos se puede determinar el porcentaje que existe en un desvanecimiento selectivo:

$$P_{ds} = 100 * 1,72240 * 10^{-6} * 4,32 * 15,4 * \left(\frac{3,6758 * 10^{-4}}{38,580} \right)$$

$$P_{ds} = 1,09176 * 10^{-7}\%$$

Cálculo de desvanecimiento total

$$P_T = (P_{dp}^{\frac{\alpha}{2}} + P_{ds}^{\frac{\alpha}{2}})^{\frac{2}{\alpha}} \quad (3.12)$$

Para $\alpha=2$

$$P_T = (5,3741 * 10^{-11\frac{2}{2}} + 1,09176 * 10^{-7\frac{2}{2}})^{\frac{2}{2}}$$

$$P_T = 1,092305 * 10^{-7}\%$$

Para conocer la disponibilidad y el tiempo fuera de servicio, se realizan los siguientes cálculos.

Cálculo de disponibilidad

$$D\% = 100 - P\% \quad (3.13)$$

$$D = (100 - 1,092305 * 10^{-7})\%$$

$$D = 99,99999989\%$$

La indisponibilidad del sistema será calculará como el tiempo fuera de servicio para el peor mes del año como se indica a continuación:

$$tfs = 365 * \frac{P\%}{100} * 24 * 60 \text{ minutos} \quad (3.14)$$

$$tfs = 365 * \frac{1,092305 * 10^{-7}}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 0.03444 \text{ s}$$

Para $\alpha=1.5$

$$P_T = (5,3741 * 10^{-11} \frac{1.5}{2} + 1,09176 * 10^{-7} \frac{1.5}{2}) \frac{2}{1.5}$$

$$P_T = 1,09657 * 10^{-7} \%$$

Calculo de disponibilidad

$$D = (100 - 4,8107 * 10^{-5}) \%$$

$$D = 99,99999989 \%$$

La indisponibilidad del sistema será calculará como el tiempo fuera de servicio para el peor mes del año como se indica a continuación:

$$tfs = 365 * \frac{P\%}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 365 * \frac{4,8107 * 10^{-7}}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 0,03458 \text{ s}$$

Tabla. 18. Tiempo Fuera de Servicio.

PARA α	SEGUNDOS
1.5	0,03458
2	0.03444

El cálculo de la probabilidad de rebasar un desvanecimiento profundo para el vano entre Repetidor-Estación base, se utilizará la siguiente ecuación:

$$P_{dp} = P_o * 10^{-M/10}$$

Donde:

$$P_o = k * Q * f * d^3$$

$$P_o = 2.1 * 10^{-5} * Q * 2,4 * (2,86)^3$$

$$P_o = 2.1 * 10^{-5} * S^{-1.3} * 2,4 * (2,86)^3$$

Para el cálculo de rugosidad se utiliza la ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(h_i - \bar{h})^2}{n}} ; h = \sum \frac{h_i}{n}$$

$$h = \frac{84640.875}{34} = 2489.4375$$

$$S = \sqrt{\frac{14804,875}{34}}$$

$$S = 20,8671$$

El cálculo de la distribución de probabilidad es:

$$P_o = 2.1 * 10^{-5} * (20.8671)^{-1.3} * 2,4 * (2,86)^3$$

$$P_o = 2.27105 * 10^{-5}$$

Con estos valores se puede obtener el desvanecimiento plano:

$$P_{dp} = P_o * 10^{-M/10}$$

$$P_{dp} = 2.27105 * 10^{-5} * 10^{-35,165/10}$$

$$P_{dp} = 6,91395 * 10^{-9}\%$$

Con la siguiente ecuación, realizamos el cálculo de desvanecimiento selectivo

$$P_{ds} = 100 * \eta * 4.32 * k * \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)$$

Probabilidad de desvanecimiento multi-trayecto:

$$\eta = 1 - e^{-0.2(P_o)^{3/4}}$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2(2.27105 * 10^{-5})^{3/4}}$$

$$\eta = 6,57939 * 10^{-5}$$

Cálculo del tiempo medio de retardo:

$$\tau_m = 0.7 * \left(\frac{d}{50}\right)^{1.3} \quad [ns]$$

$$\tau_m = 0.7 * \left(\frac{2,86}{50}\right)^{1.3} \quad [ns]$$

$$\tau_m = 16,97121 * 10^{-3} \quad [ns]$$

Cálculo del periodo de símbolo.

$$\tau_s = 6 * \frac{1}{155,52 * 10^6} \quad [ns]$$

$$\tau_m = 38,580 \quad [ns]$$

Con los cálculos obtenidos se puede determinar el porcentaje que existe en un desvanecimiento selectivo:

$$P_{ds} = 100 * 6,57939 * 10^{-5} * 4.32 * 15,4 * \left(\frac{16,97121 * 10^{-3}}{38,580} \right)$$

$$P_{ds} = 1,925487 * 10^{-4}\%$$

Cálculo de desvanecimiento total:

$$P_T = (P_{dp}^{\frac{\alpha}{2}} + P_{ds}^{\frac{\alpha}{2}})^{\frac{2}{\alpha}}$$

Para $\alpha=2$

$$P_T = (6,91395 * 10^{-9\frac{2}{2}} + 1,925487 * 10^{-4\frac{2}{2}})^{\frac{2}{2}}$$

$$P_T = 1,925556 * 10^{-4}\%$$

Para conocer la disponibilidad y el tiempo fuera de servicio, se realizan los siguientes cálculos.

Cálculo de disponibilidad

$$D\% = 100 - P\%$$

$$D = (100 - 1,925556 * 10^{-4})\%$$

$$D = 99,9998074\%$$

La indisponibilidad del sistema será calculará como el tiempo fuera de servicio para el peor mes del año como se indica a continuación:

$$tfs = 365 * \frac{P\%}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 365 * \frac{1,925556 * 10^{-4}}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 60.724 \text{ s}$$

Para $\alpha=1.5$

$$P_T = (6,91395 * 10^{-9 \frac{1.5}{2}} + 1,925487 * 10^{-4 \frac{1.5}{2}})^{\frac{2}{1.5}}$$

$$P_T = 1,926677 * 10^{-4}\%$$

Cálculo de disponibilidad

$$D = (100 - 1,926677 * 10^{-4})\%$$

$$D = 99,99980733\%$$

La indisponibilidad del sistema será calculará como el tiempo fuera de servicio para el peor mes del año como se indica a continuación:

$$tfs = 365 * \frac{P\%}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 365 * \frac{1,926677 * 10^{-4}}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 60,759 \text{ s}$$

Tabla. 19. Tiempo Fuera de Servicio.

PARA α	SEGUNDOS
1.5	60,759
2	60.724

3.4.4 Cálculo de indisponibilidad de los equipos (CARDENAS, 2011)

Los equipos necesarios para el funcionamiento de la red de monitoreo se hallan compuestos, módulos de energía, acondicionadores de señales, Sensores Inalámbricos WSN Crossbow, Transceptor de RF y antenas.

Considerando un Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) de 35040 horas y un Tiempo Promedio entre Reparaciones (MTTR) de 5 horas, la indisponibilidad de un solo equipo ya sea WTW o Crossbow, será:

$$U\% = \frac{MTTR}{MTTR+MTBF} * 100 \quad (3.15)$$

$$U\% = \frac{5}{5+35040} * 100$$

$$U\% = 0.014267=q$$

Para la indisponibilidad de equipos conectados en serie se lo realiza con la siguiente expresión:

$$(MTBR)^{-1}_T = (MTBR)^{-1}_1 + (MTBR)^{-1}_2 + \dots + (MTBR)^{-1}_n \quad (3.16)$$

Para el caso de una sola mota, los equipos que se hallan en serie serán:

- ✓ Acelerómetro
- ✓ Fuente de energía
- ✓ Acondicionador de señales.
- ✓ Tarjeta MDA300CA.
- ✓ Tarjeta MPR2400.
- ✓ Amplificador de RF.
- ✓ Antena Omnidireccional.

Por lo tanto se trata de un subsistema de siete elementos conectados en serie

Si consideramos que el MTBF y MTTR promedio de todos los equipos es de 35040 horas y 5 horas respectivamente, el MTBF total se hallará de la siguiente manera:

$$(MTBR)^{-1}_T = 7 * (MTBR)^{-1}_1 = 7 * \left(\frac{1}{35040}\right)$$

$$(MTBR)^{-1}_T = 5005 \text{ horas}$$

Como era de esperarse, el tiempo promedio entre fallas disminuye, ya que existen varios subsistemas que vuelven más vulnerable a la totalidad de la mota.

Considerando la red de la Figura. 40, la cual dispone de 3 vanos, un canal disponible por vano y cero enlaces redundantes, se calcula la indisponibilidad total del sistema de la siguiente manera:

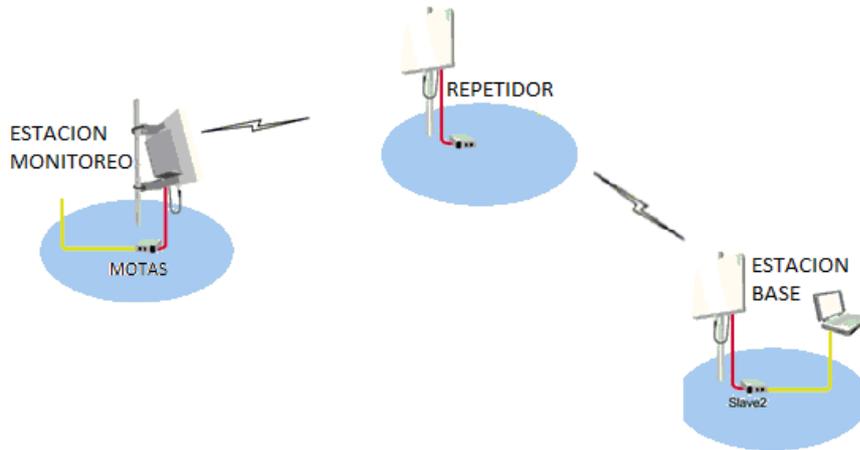


Figura. 40. Red de monitoreo.

$$U\% = \frac{200}{M} * \left(\frac{M+N}{N+1} \right) * (m * q)^{N+1} \quad (3.17)$$

Donde

M = número de canales disponibles

N = número de canales de reserva

m = número de vanos

Para este caso tendremos, M = 1, N = 0, m = 2, q = 0.014267 * 10⁻².

$$U\% = \frac{200}{1} * \left(\frac{1+0}{0+1} \right) * (2 * 0.014267 * 10^{-2})^{0+1}$$

$$U\% = 4.93316 * 10^{-4} = 0.04933\%$$

Esto representa un valor aceptable para el diseño de nuestro sistema.

Cálculo de la alineación de las antenas

El Angulo de elevación es el que se forma entre la dirección del haz de la onda electromagnética y el plano horizontal, el valor del ángulo es inversamente proporcional a la distancia del enlace, esto es que si el valor del ángulo es pequeño, mayor será la distancia que recorre la onda.

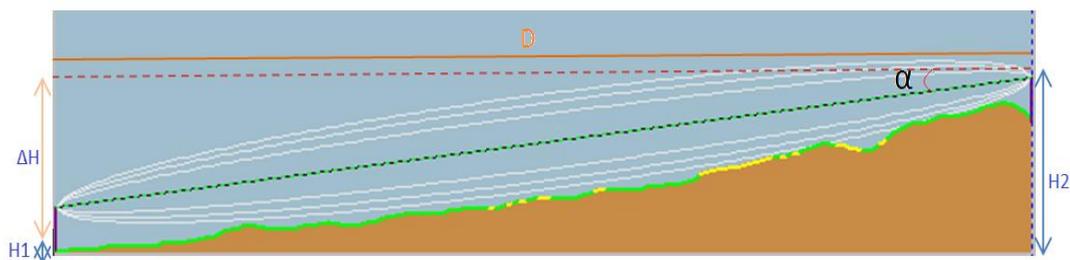


Figura. 41. Angulo de elevación.

Como se indica en la Figura.41, entre la antena de transmisión y la antena de recepción se forma un triángulo rectángulo donde: ΔH (variación de alturas), D distancia del trayecto, α el ángulo de elevación.

Tabla. 20. Altura de las Estaciones del primer enlace.

		DISTANCIA [Km]	ALTURA [m]
H1	Transmisor	0	2462.3
H2	Receptor	0.15	2468

La variación de la altura se calcula:

$$\Delta H = H2 - H1 \quad (3.18)$$

$$\Delta H = 2468 - 2462.3$$

$$\Delta H = 5.7[m]$$

Utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene el ángulo de elevación

$$\tan \alpha = \frac{\Delta H}{D} \quad (3.19)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{5.7}{0.15}$$

$$\alpha = 1.544^{\circ}$$

El azimut se define como el ángulo horizontal que está formado entre la dirección del haz de onda electromagnética y el plano vertical. Se toma como referencia al norte magnético como cero grados, y el giro se lo hace en sentido de las manecillas del reloj.

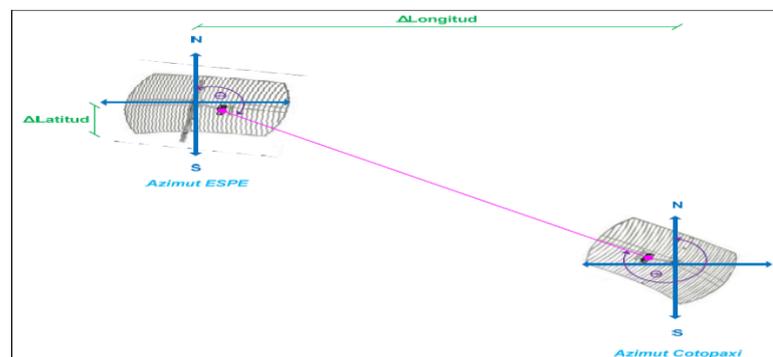


Figura. 42. Angulo de apuntamiento y Azimut.

Para el cálculo del azimut se necesita primero determinar el ángulo de apuntamiento.

Cálculo de variación de latitud

$$\Delta_{latitud} = lat_{monitoreo} - lat_{repetidor} \quad (3.20)$$

$$\Delta_{latitud} = 0^{\circ}17'40.4'' - 0^{\circ}17'44.9''$$

$$\Delta_{latitud} = -1.25 * 10^{-3}$$

Cálculo de variación de longitud

$$\Delta_{longitud} = lon_{monitoreo} - lon_{repetidor}$$

$$\Delta_{longitud} = 78^{\circ}27'44.8'' - 78^{\circ}27'43.3''$$

$$\Delta_{longitud} = 4.17 * 10^{-4}$$

Cálculo del ángulo de apuntamiento.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta_{latitud}}{\Delta_{longitud}} \quad (3.21)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-1.25 * 10^{-3}}{4.17 * 10^{-4}} \right)$$

$$\theta = -71.565^{\circ}$$

Cálculo de azimut Monitoreo

$$\Delta Z_{Monitoreo} = 90^{\circ} + [\theta] \quad (3.22)$$

$$\Delta Z_{Monitoreo} = 90^{\circ} + 71.565^{\circ}$$

$$\Delta Z_{Monitoreo} = 61.565^{\circ}$$

Cálculo de azimut Repetidor

$$\Delta Z_{repetidor} = 270^{\circ} + [\theta] \quad (3.23)$$

$$\Delta Z_{repetidor} = 270^{\circ} + 71.565^{\circ}$$

$$\Delta Z_{repetidor} = 341.565^{\circ}$$

Tabla. 21. Altura de las Estaciones del segundo enlace.

		DISTANCIA	ALTURA
		[Km]	[m]
H1	Transmisor	0	2468
H2	Receptor	2.86	2512.1

La variación de la altura se calcula:

$$\Delta H = H2 - H1$$

$$\Delta H = 2512.1 - 2468$$

$$\Delta H = 44.1[m]$$

Utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene el ángulo de elevación

$$\tan \alpha = \frac{\Delta H}{D}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{44.1}{2.86}$$

$$\alpha = 1.5060^{\circ}$$

Cálculo de variación de latitud

$$\Delta_{latitud} = lat_{repetidor} - lat_{est.base}$$

$$\Delta_{latitud} = 0^{\circ}17'44.9'' - 0^{\circ}18'49.9''$$

$$\Delta_{latitud} = -18.056 * 10^{-3}$$

Cálculo de variación de longitud

$$\Delta_{longitud} = lon_{repetidor} - lon_{est.base}$$

$$\Delta_{longitud} = 78^{\circ}27'43.3'' - 78^{\circ}26'37.6''$$

$$\Delta_{longitud} = 18.25 * 10^{-3}$$

Cálculo del ángulo de apuntamiento.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta_{latitud}}{\Delta_{longitud}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-18.056 * 10^{-3}}{18.25 * 10^{-3}} \right)$$

$$\theta = -44.6938^{\circ}$$

Cálculo de azimut Repetidor

$$\Delta Z_{Repetidor} = 90^{\circ} + [\theta]$$

$$\Delta Z_{Repetidor} = 90^{\circ} + 44.6938^{\circ}$$

$$\Delta Z_{Repetidor} = 134.6938^{\circ}$$

Cálculo de azimut Estación Base

$$\Delta Z_{est.base} = 270^0 + [\theta]$$

$$\Delta Z_{est.base} = 270^0 + 44.6938^0$$

$$\Delta Z_{est.base} = 314.6938^0$$

3.5 Sistema de Alimentación de los Sensores

El consumo eléctrico de una red de monitoreo se puede dividir en tres partes, consumo eléctrico de las estaciones de monitoreo, consumo eléctrico de las repetidoras y consumo eléctrico de cada mota.

Como se sabe cada mota posee su propia fuente de energía que por lo general son baterías, sin embargo se tomará en cuenta su potencia para el diseño del sistema fotovoltaico. Entonces el cuadro de consumo eléctrico se resume a lo indicado en la Tabla.22.

Tabla. 22. Consumo de energía individual de las estaciones de monitoreo, de la repetidora y el subsistema de 7 WSN.

Item	COMPONENTES	CONSUMO (Watts)
1	Estaciones U1, U2	
	Computador portátil	60
	Router WiFi	11
	Amplificador RF 2.4 GHz	11
	CONSUMO POR CADA ESTACION	82
2	Repetidor	
	Amplificador RF 2.4 GHz	11
	Repetidor 2.4 GHz	11
	CONSUMO DE LA REPETIDORA	22
3	7 Motas en la Estación de Monitoreo	
	Aproximadamente el consumo de cada mota es 0,18 Watts	12,6

El sistema de alimentación principal de la estación de monitoreo, la repetidora y el nodo central, será tomado de la red eléctrica. Sin embargo nos nuestro sistema de monitoreo cuenta con el diseño de sistemas fotovoltaicos, si las condiciones requieren de su aplicación. Para asegurar el funcionamiento en caso de falla del sistema principal.

3.6 Tolerancia a fallas (Grupo de Radiocomunicación, Departamento SSR, 2007)

Como se vio en los apartados anteriores, la tolerancia a fallas se puede dividir en algunos aspectos como es: la búsqueda de enlaces redundantes y sistemas alternativos de provisión de energía eléctrica.

- El primer aspecto de enlaces redundantes ya fue analizado en puntos anteriores, concluyendo que para nuestro sistema de monitoreo no existe enlaces redundantes debido a que la distancia de la red de transporte no es muy grande.

- El esquema general del sistema alternativo eléctrico fotovoltaico, que se propone para alimentar el sistema, se representa a través de la Figura.43:

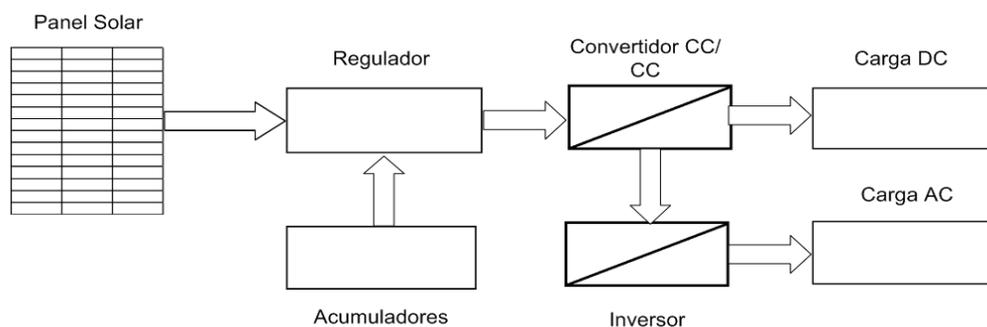


Figura. 43. Esquema General del sistema Fotovoltaico.

La Figura.43, muestra los componentes que intervienen en un sistema fotovoltaico.

Los parámetros que se deben tomar en cuenta en el diseño son los siguientes:

El primer paso es saber el valor de la Irradiancia solar en el Ecuador para el peor mes del año. Esto es de 3.691 Kwh/m² día, en el mes de Junio, y un valor de 5.132 Kwh/m² día, para el mes de Enero (Grupo de Radiocomunicación, Departamento SSR, 2007).

El segundo paso, es el cálculo de la energía eléctrica requerida: este valor depende de la aplicación y cantidad de carga que requiere el subsistema. Con los valores de consumo en CC y CA de los equipos y considerando un factor de seguridad del 15% y una eficiencia del inversor de tensión del 85%, se obtiene el detalle de consumo de energía que necesita la unidad de monitoreo U2. Considerando un valor de voltaje máximo del panel igual a 26.3 V, se calcula también la corriente máxima por hora. En la Tabla.23, se muestra el detalle de las cargas a instalarse en el sistema fotovoltaico.

Tabla. 23. Consumo de energía de la Unidad de Monitoreo.

COMPONENTES	CONSUMO (Watts)	Nro UNIDADES	CORRIENTES (A)	TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO (HORAS)	ENERGIA=N *P*th (Watts.h/día)
Estaciones U1, U2					
Computador portátil	65	1	3,3823	8	520
Router WiFi	15	1	1,2401	8	120
Amplificador RF 2.4 GHz	15	1	1,2401	8	120
CONSUMO TOTAL	95	3	5,8625	24	760

Cálculo para el mes más desfavorable: para esto se calcula el cociente entre la energía eléctrica de consumo eléctrico y la Irradiancia promedio Hs.

$$Y_{MAX} = \frac{E_{elec}[Watts*h/d]}{H_s [(Watts*\frac{h}{d})/m^2]} \quad (3.24)$$

$$Y_{MAX} = 0.25 \text{ m}^2$$

Con estos resultados se propone un panel solar cuyas características se describen en la Tabla.24.

Tabla. 24. Consumo de energía de la Unidad de Monitoreo.

ESPECIFICACION ELECTRICA	
MODELO	KC200GT
FUENTE MAX	200 Watts
VOLTAJE MAX	23.6 Volts
LONGITUD	1425mm
ANCHO	990mm
PESO	18.5 Kg

El número de módulos fotovoltaicos se calcula de la siguiente manera:

$$\#Mod = \frac{Y_{MAX}}{Pot (KWatts)} * 1.1 \quad (3.25)$$

Donde Pot: Potencia nominal del panel solar

$$\#Mod = \frac{0.25}{0.200} = 1.375 \text{ paneles} \quad (3.26)$$

El coeficiente de 1.1 es un valor de seguridad aplicado al diseño. Como se puede observar en el cálculo anterior, el número total de paneles sería entonces:

$$\#Mod=2 \text{ panel}$$

Sistema de baterías: se deben considerar los siguientes parámetros:

- ✓ Pd,max: profundidad máxima de descarga de batería, 0.6 a 0.8
- ✓ Pd,diaria: profundidad máxima de descarga diaria, 0.2

- ✓ VT,bat: voltaje de trabajo de baterías, 12 V
- ✓ tiempo,auto: tiempo de autonomía, entre 6 y 10 días
- ✓ Para el presente diseño se escogen los siguientes parámetros:
- ✓ Pd,max = 0.7
- ✓ Pd,diaria = 0.2
- ✓ VT,bat = 12 V
- ✓ tiempo,auto = 3 días

Por lo tanto la capacidad de corriente del sistema de baterías ($C_{bat,total}$ [A*h]) se halla de la siguiente forma:

$$C_{bat, total} = \frac{tiempo,auto * E_{MAX}}{Pd,max * VT,bat} * 1.1 \quad (3.27)$$

$$C_{bat, total} = \frac{3 * 760}{0,7 * 12} * 1.1 = 298,571 [A * h]$$

El número de baterías se calcula entonces:

$$Numero, bat = \frac{C_{bat,total}}{C_{bat,unitaria}} = 2,714 \cong 3 \text{ baterias} \quad (3.28)$$

Donde $C_{bat,unitaria}$ es la capacidad de corriente que provee una sola batería. Para el diseño se toma el valor máximo de una batería que es 110 A.h. Para el diseño del sistema de regulación: se deben dimensionar los fusibles térmicos básicamente bajo la consideración de un aumento del 25% por cuestiones de seguridad. La siguiente Figura muestra el diagrama de conexión de cables de los paneles solares y el sistema de baterías al regulador de carga.

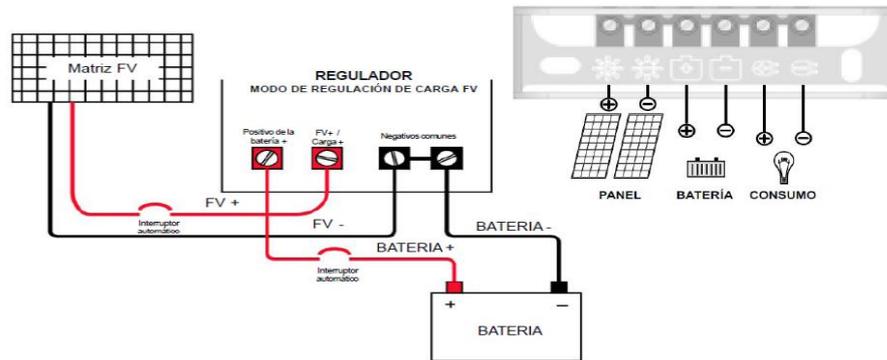


Figura. 44. Diagrama de conexión del regulador (Espinoso, 2008).

Para realizar el dimensionamiento del Inversor, se considera dos tipos de potencia:

- ✓ P_{inv} : potencia en servicio continuo que es igual a la suma de las potencias de todas las cargas que trabajan simultáneamente. A este valor es recomendable sumarle un 25%.
- ✓ $P_{p,inv}$: potencia pico del inversor en caso de proveer potencias pico hacia las cargas.

Este diseño para la aplicación se requieren potencias picos para su funcionamiento, por lo que se considerará solamente la potencia total multiplicada por el 1.25%. Esto es: $95 \times 1.25 = 118.75W$. El Inversor entonces deberá manejar una potencia de al menos 120W.

3.7 Resultados de la Simulación en NS2

La simulación de la red de sensores inalámbricos responde a una topología y específica de técnicas de los WSN cuya justificación se muestra a continuación.

El monitoreo de puentes tiene dos partes importantes.

La primera el modelamiento de la respuesta ante ciertas clases de excitación, para saber los daños sufridos en la estructura, obteniendo un aproximado del nivel de daño e incluso la posición en la que se presenta.

Lo segundo, la utilización de acelerómetros hace posible tener un control total de la señal de excitación, que captura el movimiento de puentes, esto hace posible identificar de una manera más fácil y rápida los factores que afectan a la estructura.

La ventaja de aplicar los sensores es que su respuesta se la puede modelar dependiendo del estudio que se lo quiera realizar.

3.8 Topología de la red de sensores inalámbricos

El presente trabajo no pretende analizar la validez de la interpretación de los resultados, más bien se trata de proponer una topología de sensores orientados a determinar las vibraciones que se producen en la estructura.

Por lo que se escogerá una topología regular de WSN como la que se indica en la Figura.45. Se utilizarán 8 nodos para la estación de monitoreo de los cuales el nodo 0 se utiliza como gateway. El resto de los nodos (1, 2, 3, 5, 6, 7) disponen de un acelerómetro para captar el movimiento de la estructura.

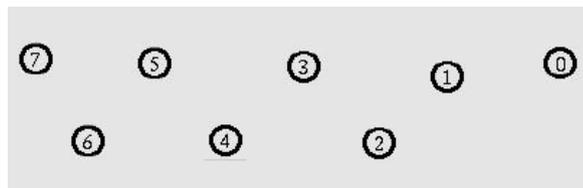


Figura. 45. Topología de WSN, que corresponde a la estación de monitoreo.

Se ha escogido el protocolo de enrutamiento AODV el que ese utiliza en la pila de protocolos de ZigBee (Sosa, 2011). Este protocolo es una elección obvia ya que opera bajo demanda, lo cual se ajusta a la aplicación física de monitoreo de variables en la estructura. Estas variables no tienen un cambio inmediato. Al estar estáticos los nodos, ayuda a mantener las tablas de ruteo sin cambios.

Se ha optado por agentes UDP y TCP. Bajo UDP se utiliza el tipo de tráfico CBR (Constant Bit Rate) ya que permite simular una categoría de servicio de datos donde el tráfico tiene una consistencia de velocidad, donde hay una confianza intrínseca entre el tiempo de sincronización entre la fuente y el destino. El tráfico insertado es de 1 Mbps con un tamaño de paquetes de 1000 bytes y empieza a 0.1 segundos del inicio de la simulación. Bajo TCP se utiliza ftp y empieza a 0 segundos del inicio de la simulación. El tiempo total de la simulación es de 120 segundos.

Se utilizó la aplicación TraceGraph 2.02 para Linux, la cual permite visualizar gráficamente los resultados de la simulación contenidos en el archivo de trazas (*.tr).

A continuación se describe algunos pasos para la conformación del programa de simulación. Se realiza la simulación utilizando el Modelo de Propagación de los Dos Rayos.

3.9 Simulación con el modelo de propagación: TwoRayGround

```
#
=====
===
# MONITOREO IEEE 802.15.4
# NUMERO DE NODOS 8
# Potencia = 0.060 W
# PRX = 4.86e-12
# Umbral = -83.1336 dBm
# Distancia Max = 100 m
#
=====
```

```

====

#
=====
====
# DECLARACION DE VARIABLES
#
=====
====

# Modelo de Propagacion: TwoRayGround
# Protocolo de enrutamiento: AODV

set val(chan)      Channel/WirelessChannel  ;# Channel Type
set val(prop)      Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model
set val(netif)     Phy/WirelessPhy/802_15_4
set val(mac)       Mac/802_15_4
set val(ifq)       Queue/DropTail/PriQueue  ;# interface queue type
set val(ll)        LL                        ;# link layer type
set val(ant)       Antenna/OmniAntenna     ;# antenna model
set val(ifqlen)    150                      ;# max packet in ifq
set val(nn)        8                       ;# number of mobilenodes
set val(rp)        AODV                    ;# routing protocol
set val(x)         100
set val(y)         100

set val(nam)       final2.nam              ;# Archivo .nam
set val(traffic)   ftp                    ;# Traffic cbr type/poisson/ftp
) #read command line arguments

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]]
    }
}

getCmdArgu $argc $argv

for {set i 1} {$i < [expr 15]} {incr i} {
    set appTime($i) [expr 10+($i-1)*1]
}

set stopTime      100 ;# in seconds

```

```

#
=====
===
# MAIN PROGRAM
#
=====
===
# Inicializacion de NS
set ns_          [new Simulator]

# Inicializacion del archivo trace
set tracefd  [open ./final2.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd

if { "$val(nam)" == "final2.nam" } {
    set namtrace  [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
}

$ns_ puts-nam-traceall {#nam4wpan#}          ;# informar Nam que se
trata de un archivo de tasa para WPAN (tratamiento espacial necesario)

Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on          ;# default = off (should be turned
on before other 'wpanNam' commands can work)
#Mac/802_15_4 wpanNam ColFlashClr gold    ;# default = gold

# For model 'TwoRayGround'
set dist(5m) 7.69113e-06
set dist(9m) 2.37381e-06
set dist(10m) 1.92278e-06
set dist(11m) 1.58908e-06
set dist(12m) 1.33527e-06
set dist(13m) 1.13774e-06
set dist(14m) 9.81011e-07
set dist(15m) 8.54570e-07
set dist(16m) 7.51087e-07
set dist(20m) 4.80696e-07
set dist(25m) 3.07645e-07
set dist(30m) 2.13643e-07
set dist(35m) 1.56962e-07
set dist(40m) 1.20174e-07
set dist(75m) 3.41828e-08
set dist(100m) 1.42681e-08

#
=====
===# create node 0-7, receiving range 100m, carrier sensing range 500m
=====
===

```

```

Phy/WirelessPhy set CPTresh_ 10.0           ;#Umbral de captura (CPTresh_)
;# Cuando se recibe 2 señales al mismo tiempo, se pondra detectar
;# exitosamente a la de mayor potencia cuando esta sea > 10dB

Phy/WirelessPhy set CSTresh_ 4.86e-12      ;#100m con -83.1336 dB
de umbral
;#Umbral de sensado de portadora (CSTresh_)
;#Es el rango de sensado de portadora de los nodos. Debe ser al menos
;# del mismo valor que el umbral de recepcion.

Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 4.86e-12     ;#100m con -83.1336 dB
de umbral
;#umbral de recepcion (RXThresh)
;# Es la minima potencia con la que recibe el paquete
;# para que pueda ser detectado exitosamente

Phy/WirelessPhy set bandwidth_ 512kb
Mac/802_15_4 set dataRate_ 250kb
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.060
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.4e+9
Phy/WirelessPhy set L_ 1.0
Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1.0
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1.0

# set up topography object
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

# Create God
set god_ [create-god $val(nn)]
set chan_1_ [new $val(chan)]

# =====#
CONFIGURACION DE NODOS
# =====$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 OFF \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
    -channel $chan_1_

```

```

#
=====
===
# DEFINICION DE NODOS
#=====
===
for {set i 0} {$i < 8} {incr i} {
set node_($i) [$ns_ node]
$node_($i) random-motion 0 ;# disable random motion
}

#Establecimiento de la posición de los nodos
    $node_(0) set X_ 80.0
    $node_(0) set Y_ 40.0
    $node_(0) set Z_ 0
    $node_(1) set X_ 70.0
    $node_(1) set Y_ 40.0
    $node_(1) set Z_ 0
    $node_(2) set X_ 60.0
    $node_(2) set Y_ 30.0
    $node_(2) set Z_ 0
    $node_(3) set X_ 50.0
    $node_(3) set Y_ 40.0
    $node_(3) set Z_ 0
    $node_(4) set X_ 40.0
    $node_(4) set Y_ 30.0
    $node_(4) set Z_ 0
    $node_(5) set X_ 30.0
    $node_(5) set Y_ 40.0
    $node_(5) set Z_ 0
    $node_(6) set X_ 20.0
    $node_(6) set Y_ 30.0
    $node_(6) set Z_ 0
    $node_(7) set X_ 10.0
    $node_(7) set Y_ 40.0
    $node_(7) set Z_ 0

    $ns_ at 0.0    "$node_(0) NodeLabel PAN Coord"
$ns_ at 0.0    "$node_(0) sscs startPANCoord 1 5 3"    ;# startPANCoord
<txBeacon=1> <BO=3> <SO=3>
for {set i 1} {$i <$val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at [expr 2+$i-1] "$node_($i) sscs startDevice 1 0"
}

Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 3ms

$ns_ at $appTime(1) "puts \"\nTransmitting data ... \n\""

#
=====

```

```

===
# GENERACION DE NODOS
#=====
===
#TRAAFICO CBR
proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_
    set tcp ($src) [new Agent/TCP] ;#tcp Tx
    eval ns_ attach-agent \ $node_($src) \ $tcp($src) ;#vincular Agente/tcp al
nodo_($src)

    set null($dst) [new Agent/Null] ;#tcp Rx
    eval $ns_ attach-agent \ $node_($dst) \ $null ($dst) ;#vincular Nullal
nodo_($dst)
    set cbr($src) [new Application/Traffic/CBR] ;#Trafico CBR
    eval \ $cbr($src) set rate_ 250k ;#dataRate
    eval \ $cbr($src) set packetSize_ 127 ;#Tamaño del paquete en
byte
    eval \ $cbr($src) set interval_ $interval ;#intervalo de Tx
    eval \ $cbr($src) set ramdom_ 0 ;#intervalo random de Tx
    eval \ $cbr($src) attach-agent \ $tcp($src) ;#vincular
App/Traffic/CBR al agent/tcp
    eval \ $ns_ connect \ $tcp($src) \ $null($dst) ;#establecer conexion
entre los dos agentes
    $ns_ at $starttime "$cbr($src) start"
}

proc poissontraffic { 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 expl($src) [new Application/Traffic/Exponential]
    eval \ $expl($src) set packetSize_ 127
    eval \ $expl($src) set burst_time_ 0
    eval \ $expl($src) set idle_time_ [expr $interval*1000.0-127.0*8/250]
    eval \ $expl($src) set rate_ 250k
    eval \ $expl($src) attach-agent \ $udp($src)
    eval $ns_ connect \ $udp($src) \ $null($dst)
    $ns_ at $starttime "$expl($src) start"
}

#ESTABLECER EL DEMO DE ANIMACION NAM
if { ("val (traffic)" == "cbr") || (" $val(traffic)" == "poisson") } {
    puts "\nTraffic: $val(traffic)"
    #Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data on
    puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd
ack4data off]]
}

```

```

eval $val(traffic)traffic 7 6 0.2 $appTime(1)
eval $val(traffic)traffic 6 5 0.2 $appTime(2)
eval $val(traffic)traffic 5 4 0.2 $appTime(3)
eval $val(traffic)traffic 4 3 0.2 $appTime(4)
eval $val(traffic)traffic 3 2 0.2 $appTime(5)
eval $val(traffic)traffic 2 1 0.2 $appTime(6)
eval $val(traffic)traffic 1 0 0.2 $appTime(7)
eval $val(traffic)traffic 7 5 0.2 $appTime(8)
eval $val(traffic)traffic 5 3 0.2 $appTime(9)
eval $val(traffic)traffic 3 1 0.2 $appTime(10)
eval $val(traffic)traffic 6 4 0.2 $appTime(11)
eval $val(traffic)traffic 4 2 0.2 $appTime(12)
eval $val(traffic)traffic 7 4 0.2 $appTime(13)
eval $val(traffic)traffic 5 2 0.2 $appTime(14)

```

```

Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p AODV -c tomato
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p ARP -c green
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p MAC -s 0 -d -1 -c navy

```

```

if { "$val(traffic)" == "cbr" } {
    set pktType cbr

```

```

Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 7 -d 6 -c blue
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 6 -d 5 -c green4
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 5 -d 4 -c cyan4
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 4 -d 3 -c violet
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 3 -d 2 -c HotPink
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 2 -d 1 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 1 -d 0 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 7 -d 5 -c yellow
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 5 -d 3 -c orange
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 3 -d 1 -c magenta
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 6 -d 4 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 4 -d 2 -c pink
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 7 -d 4 -c navy
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 5 -d 2 -c purple4

```

```

} else {
    set pktType exp
}
}

```

```

# TRAFICO FTP
proc ftptraffic { src dst starttime } {
global ns_ node_
set tcp($src) [new Agent/TCP]
eval \tcp($src) set packetSize_ 127
set sink($dst) [new Agent/TCPSink]
eval $ns_ attach-agent \node_($src) \tcp($src)

```

```

eval $ns_ attach-agent \ $node_($dst) \ $sink($dst)
eval $ns_ connect \ $tcp($src) \ $sink($dst)
set ftp($src) [new Application/FTP]
eval \ $ftp($src) attach-agent \ $tcp($src)
$ns_ at $starttime "$ftp($src) start"
}

    if { ("val (traffic)"== "ftp")} {
    puts "\nTraffic: $val(traffic)"
    #Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data on
    puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpancmd
ack4data]]

    }

    $ns_ at [expr $appTime(1)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(2) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(2)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(3) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(3)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(4) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(4)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(5) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(5)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(6) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(6)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(7) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(7)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(8) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(8)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(9) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(9)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1.2ms"
    $ns_ at $appTime(10) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(10)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate
1.2ms"
    $ns_ at $appTime(11) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(11)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate
1.2ms"
    $ns_ at $appTime(12) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(12)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate
1.2ms"
    $ns_ at $appTime(13) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(13)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate
1.2ms"
    $ns_ at $appTime(14) "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms"
    $ns_ at [expr $appTime(14)+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate
1.2ms"

    ftptraffic 7 6 $appTime(1)
    ftptraffic 6 5 $appTime(2)

```

```

ftptraffic 5 4 $appTime(3)
ftptraffic 4 3 $appTime(4)
ftptraffic 3 2 $appTime(5)
ftptraffic 2 1 $appTime(6)
ftptraffic 1 0 $appTime(7)
ftptraffic 7 5 $appTime(8)
ftptraffic 5 3 $appTime(9)
ftptraffic 3 1 $appTime(10)
ftptraffic 6 4 $appTime(11)
ftptraffic 4 2 $appTime(12)
ftptraffic 2 0 $appTime(13)
ftptraffic 3 0 $appTime(14)

```

```

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 tcp -s 7 -d 6 -c blue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 6 -d 5 -c green4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 5 -d 4 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 4 -d 3 -c DarkTurquoise
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 3 -d 2 -c violet
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 2 -d 1 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 1 -d 0 -c HotPink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 7 -d 5 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 5 -d 3 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 3 -d 1 -c yellow
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 6 -d 4 -c orange
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 4 -d 2 -c magenta
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 2 -d 0 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 3 -d 0 -c pink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 7 -d 3 -c navy
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 6 -d 2 -c purple4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 7 -d 4 -c red

```

```

Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 6 -d 7 -c blue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 5 -d 6 -c green4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 4 -d 5 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 4 -c DarkTurquoise
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 3 -c violet
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 1 -d 2 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 1 -c HotPink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 5 -d 7 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 5 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 1 -d 3 -c yellow
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 4 -d 6 -c orange
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 4 -c magenta
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 2 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 3 -c pink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 7 -c navy
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 6 -c purple4

```

```
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p ack -s 4 -d 7 -c red
```

```
$ns_ at $appTime(1) "$node_(7) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime(1) "$node_(6) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime(1) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime1) cbr traffic from node
7 to node 6\""
```

```
$ns_ at $appTime(2) "$node_(6) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime(2) "$node_(5) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime(2) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime2) cbr traffic from node
6 to node 5\""
```

```
$ns_ at $appTime(3) "$node_(5) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime(3) "$node_(4) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime(3) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime3) cbr traffic from node
5 to node 4\""
```

```
$ns_ at $appTime(4) "$node_(4) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime(4) "$node_(3) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime(4) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime4) cbr traffic from node
4 to node 3\""
```

```
$ns_ at $appTime(5) "$node_(3) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime(5) "$node_(2) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime(5) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime5) cbr traffic from node
3 to node 2\""
```

```
$ns_ at $appTime(6) "$node_(2) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime(6) "$node_(1) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime(6) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime6) cbr traffic from node
2 to node 1\""
```

```
$ns_ at $appTime(7) "$node_(1) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime(7) "$node_(0) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime(7) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime7) cbr traffic from node
1 to node 0\""
```

```
$ns_ at $appTime(8) "$node_(7) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime(8) "$node_(5) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime(8) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime8) cbr traffic from node
7 to node 5\""
```

```
$ns_ at $appTime(9) "$node_(5) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime(9) "$node_(3) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime(9) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime9) cbr traffic from node
5 to node 3\""
```

```
$ns_ at $appTime(10) "$node_(3) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime(10) "$node_(1) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime(10) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime10) cbr traffic from
```

```

node 2 to node 1\""

    $ns_ at $appTime(11) "$node_(6) NodeClr DarkTurquoise"
    $ns_ at $appTime(11) "$node_(4) NodeClr DarkTurquoise"
    $ns_ at $appTime(11) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime11) cbr traffic from
node 6 to node 4\""

    $ns_ at $appTime(12) "$node_(4) NodeClr pink"
    $ns_ at $appTime(12) "$node_(2) NodeClr pink"
    $ns_ at $appTime(12) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime12) cbr traffic from
node 4 to node 2\""

    $ns_ at $appTime(13) "$node_(2) NodeClr PaleVioletRed"
    $ns_ at $appTime(13) "$node_(0) NodeClr PaleVioletRed"
    $ns_ at $appTime(13) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime12) cbr traffic from
node 2 to node 0\""

    $ns_ at $appTime(14) "$node_(3) NodeClr red"
    $ns_ at $appTime(14) "$node_(0) NodeClr red"
    $ns_ at $appTime(14) "$ns_ trace-annotate \"(at appTime12) cbr traffic from
node 3 to node 0\""

# define the node size in nam
for {set i 1} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 4
}

    $ns_ initial_node_pos $node_(0) 7
#=====
=
#FINALIZACION
#=====
=

#tell nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    $ns_ at $stopTime "$node_($i) reset";
}

# Llamar al proceso "stop" a los 120 s
$ns_ at $stopTime "stop"
$ns_ at $stopTime "puts \"\\nNS EXITING...\\n\""
$ns_ at $stopTime "$ns_ halt"

#Definicion del proceso "stop"
proc stop {} {
global ns_ tracefd appTime1 val env
$ns_ flush-trace
close $tracefd
set hasDISPLAY 0
foreach index [array names env] {

```

```

#puts "$index: $env($index)"
if {("$index" == "DISPLAY") && (" $env($index)" != "")}{
    set hasDISPLAY 1
}
}
if {("$sval(nam)" == "final2.nam") && (" $hasDISPLAY" == "1")}{
    exec nam final2.nam &
}
}
}

puts "\nStarting Simulation..."
$ns_ run

```

La simulación se la realiza bajo el modelo de propagación TwoRayGround, la tasa de transmisión que se genera es bajo la aplicación CBR y contiene el protocolo TCP de transporte de información, estos parámetros nos permitirán simular las condiciones del sistema WSN.

Las características de simulación se presentan en la Tabla.25.

Tabla. 25. Características de la red de Sensores.

SIMULACION EN NS-2	
Modelo de Radio-Propagación	TwoRayGround
Tipo de Canal	WirelessChannel
Interfaz de Red	802.15.4
MAC	802.15.4
Interface Queue	DropTail/PriQueue
Tipo de Antena	Omnidireccional
Max-Numero Paquetes	248
Numero de Nodos	8
Protocolo de Enrutamiento	AODV
Capa de Transporte	TCP
Capa de Aplicación	CBR
Umbral de Captura	10 [dB]
Umbral de sensado de Portadora	4.86e-12 [W]
Umbral de recepción	4.86e-12 [W]
Potencia de Transmisión	0.060 [W]
Frecuencia de Transmisión	2.4 [GHz]
Pérdidas	1 [dB]

Continúa 

Ganancia de Antena de Tx	1 [dBi]
Ganancia de Antena de Rx	1 [dBi]
Tamaño del Paquete	127 [Bytes]
Tasa de Transmisión	250 [kbps]
Tiempo de Simulación	100 [s]
Área	100x100 [m]

Cálculo de la Potencia de Recepción en Base a la Propagación TwoRayGround

Para el desarrollo de la simulación es necesario determinar el valor de la potencia de recepción bajo el modelo de propagación TwoRayGround.

$$P_{Rx}(d) = \frac{P_{Tx} * G_{Tx} * G_{Rx} * h_{Tx}^3 * h_{Rx}^3}{d^2 * L} \quad (3.29)$$

Donde:

Tabla. 26. Características de la Simulación.

CARACTERISTICAS	SIMBOLOGIA	VALOR
Distancia [m]	D	100
Altura Antena Rx [m]	h_{Tx}	1.5
Altura Antena Tx [m]	h_{Rx}	1.5
Perdidas por Propagación [dB]	L	1
Ganancia de Antena Rx [dBi]	G_{Rx}	1
Ganancia de Antena Tx [dBi]	G_{Tx}	1
Potencia de Transmisión [mW]	P_{Tx}	60

A continuación, se obtiene el valor de la potencia de recepción, reemplazando los valores.

$$P_{Rx}(d) = \frac{0.06 * 1 * 1 * 1.5^3 * 1.5^3}{100^4 * 1} = 30375^{-12} [W]$$

Resultados

Gracias a la herramienta NAM, se puede observar el comportamiento de la red como muestra la Figura.46.

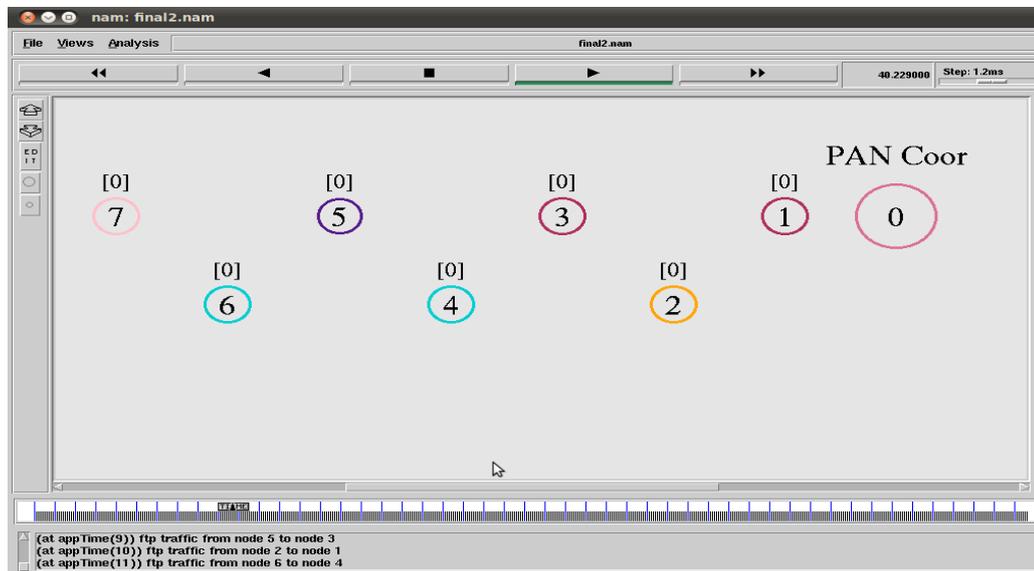


Figura. 46. Propagación e intercambio de paquetes.

También los resultados se los puede analizar con la herramienta Network Information de TraceGraph como indica la Figura.47.

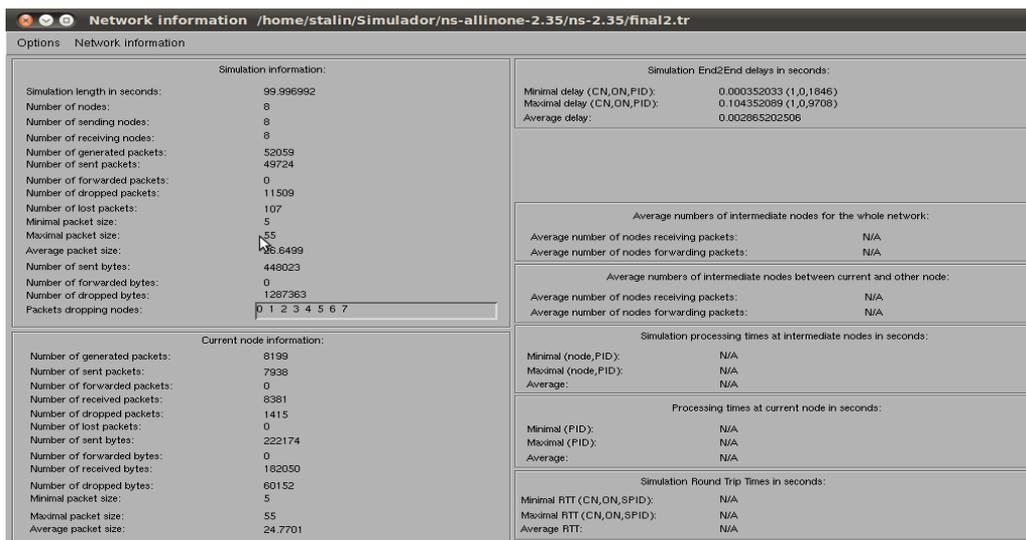


Figura. 47. Network Information.

El programa NS-2, crea un archivo .tr, que con la ayuda de TraceGraph podemos visualizar los datos que contiene el archivo de traza. La Tabla.27. Es un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla. 27. Resumen de los resultados de la simulación.

RESULTADOS DE LA SIMULACION	
Tiempo de Simulación	99.996992 [s]
Número de Nodos	8
Número de Nodos RX	8
Número de Nodos Tx	8
Número de Paquetes Generados	52059
Número de Paquetes Enviados	49724
Número de Paquetes Recibidos	49617
Número de Paquetes Caídos	11509
Número de Paquetes Perdidos	107
Tamaño Máximo del Paquete	174
Tamaño Mínimo del Paquete	5
Promedio del tamaño-Paquete	26.6499
Número de Bytes Enviados	448023
Número de Bytes Recibidos	182050
Número de Bytes Caídos	1287363
Retardo Mínimo	0.000352033
Retardo Máximo	0.10435209
Retardo Promedio	0.002865202506

Las Figuras.48 y 49 son graficas del TraceGraph, que nos muestran la suma acumulada del número de paquetes y de bytes para los diferentes eventos.

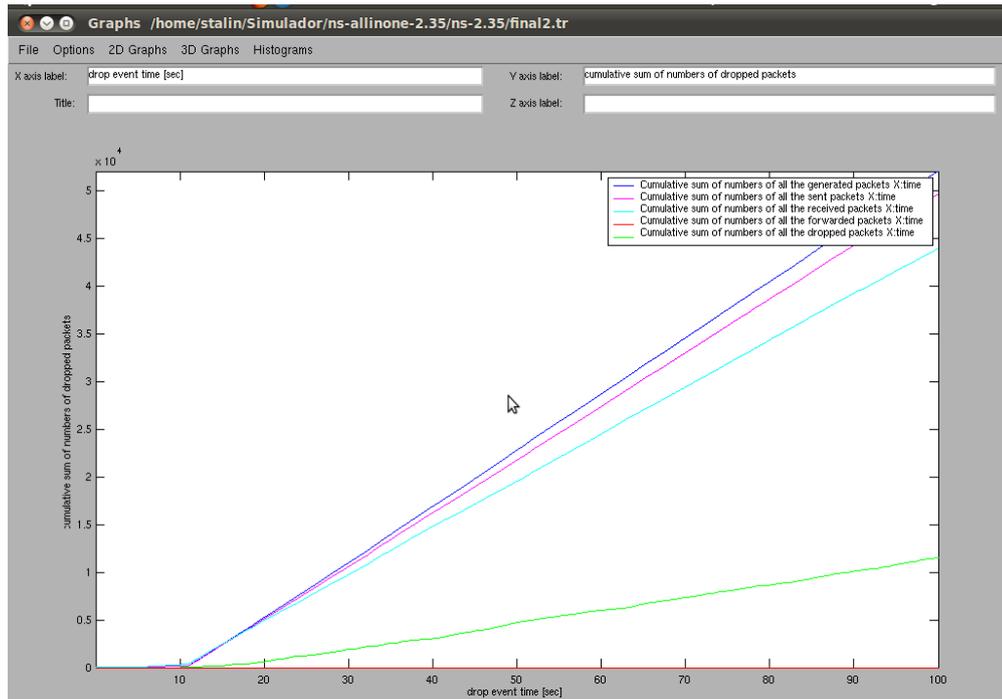


Figura. 48. Suma acumulada del Número de Paquetes.

La Figura.48, muestra que la cantidad de paquetes generados, enviados y recibidos, aumenta en la medida que transcurre el tiempo de simulación.

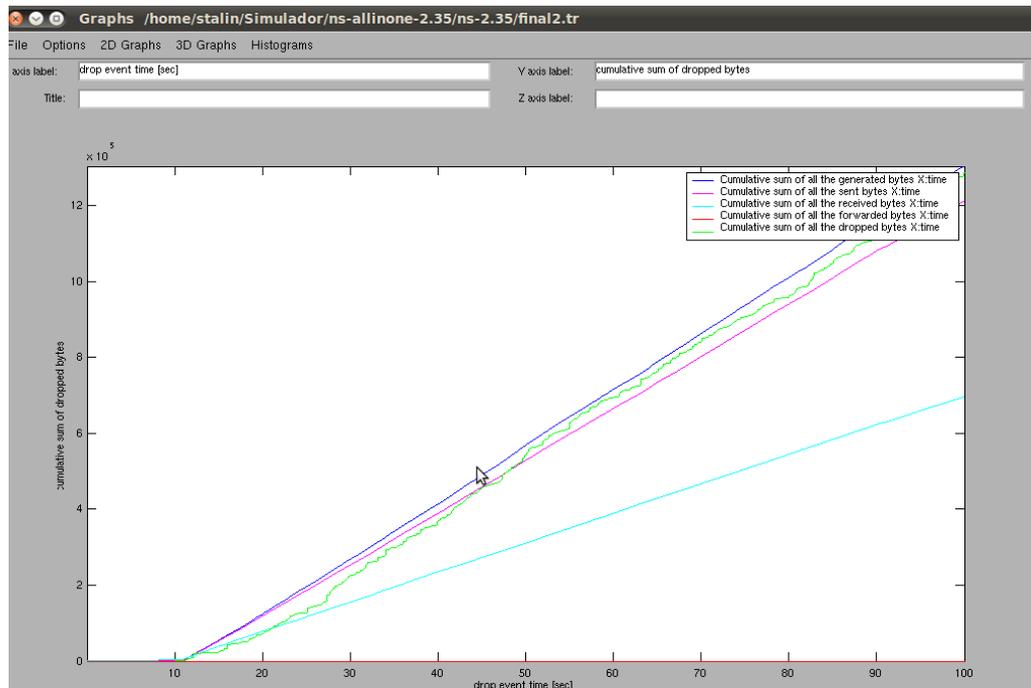


Figura. 49. Suma acumulada del Número de Bytes.

A continuación se realiza un análisis de diferentes parámetros de la red inalámbrica la cual nos permite definir el comportamiento de la misma.

Análisis del Throughput de la Red

Para determinar la cantidad de información que se entrega en un determinado tiempo sobre un canal de comunicación, se necesita obtener el Throughput de la red, para lo cual utilizaremos los valores desplegados en Network Information de TRaceGraph.

Para el Cálculo del Throughput de la red se lo hace con la siguiente ecuación.

$$\text{Throughput de la Red} = \frac{B_{Tx}}{t_{Tx}} \quad (3.30)$$

Remplazando con los valores obtenidos.

$$\text{Throughput de la Red} = \frac{448023}{99.996992}$$

$$\text{Throughput de la Red} = 4480.36476 \left[\frac{\text{Bytes}}{s} \right]$$

Throughput de la Red en Función al Número de Nodos

El Throughput de la red en función de nodos se obtiene aplicando la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{8 * N_e}{T} \left[\frac{\text{Bytes}}{s} \right] \quad (3.31)$$

Remplazando con los valores obtenidos.

$$\eta = \frac{8 \cdot 448023}{99.996992} \left[\frac{\text{Bytes}}{s} \right]$$

$$\eta = 35842.91815 \left[\frac{\text{Bytes}}{s} \right]$$

Throughput Real de la Red en Función al Número de Nodos

Para determinar el Throughput real de la red, se lo realiza utilizando la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{8 \cdot N_e \cdot (1-r)}{T} \left[\frac{\text{Bytes}}{s} \right] \quad (3.32)$$

Donde:

$$r = \frac{P_p}{P_e}$$

Reemplazando los valores en las ecuaciones.

$$r = \frac{107}{49724}$$

$$r = 2.15 \cdot 10^{-3}$$

$$\eta = \frac{8 \cdot 448023 \cdot (1 - 2.15 \cdot 10^{-3})}{99.996992} \left[\frac{\text{Bytes}}{s} \right]$$

$$\eta = 35765.78855 \left[\frac{\text{Bytes}}{s} \right]$$

Throughput Normalizado de la Red en Función al Número de Nodos

Para determinar el Throughput normalizado de la red, se lo realiza utilizando la siguiente ecuación.

$$\frac{\eta'}{\eta} = (1 - r) \quad (3.33)$$

Donde:

$$\frac{\eta'}{\eta} = (1 - 2.15 * 10^{-3})$$

$$\frac{\eta'}{\eta} = 0.99784$$

El Throughput de la red alcanza a un valor $35842.91815 \left[\frac{\text{Bytes}}{\text{s}} \right]$, que con una velocidad de 250 [kbps], representa el 0.9978% de la capacidad máxima que puede presentarse en la red, con estos valores podemos asegurar que la red posee unos valores aceptables para su posterior implementación, Pero hay que tener en cuenta que existen periodos de tiempo en los cuales la red tiene un decrecimiento.

Las siguientes figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21, son la representación de los resultados y el análisis del Throughput de la red, obtenidos bajo la herramienta TraceGraph.

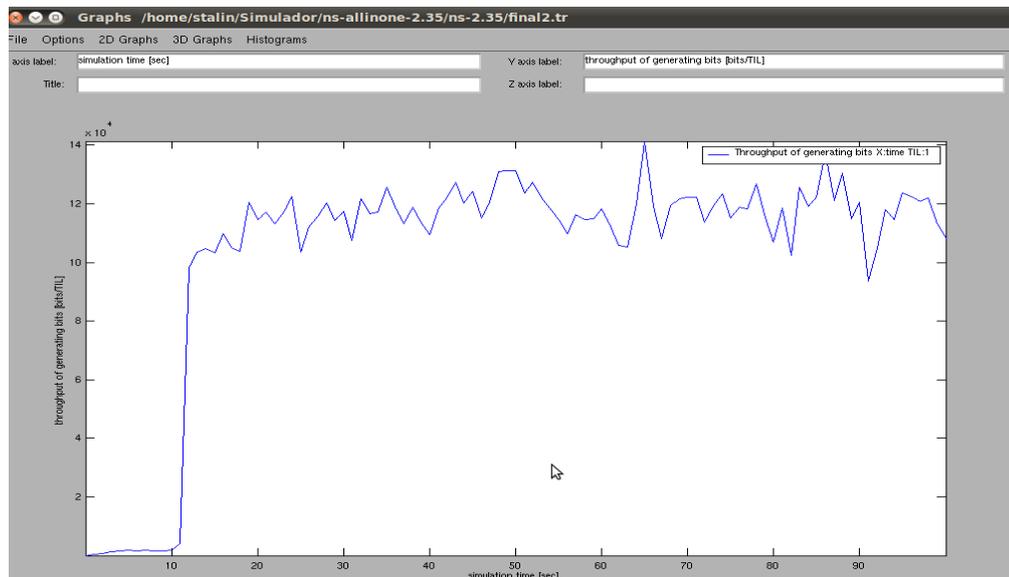


Figura. 50. Throughput de bits generados.

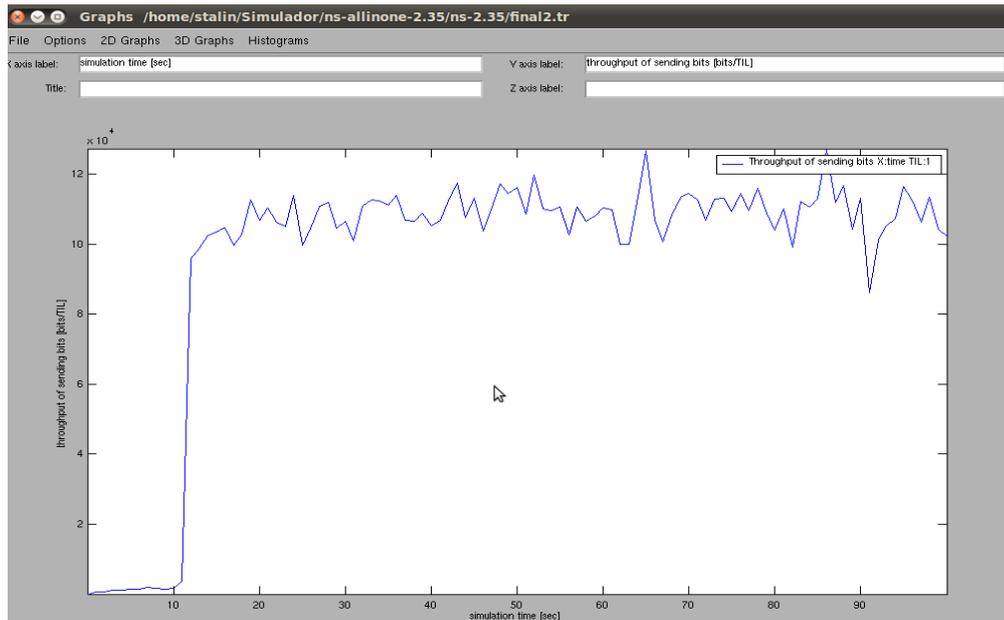


Figura. 51. Throughput de bits enviados.

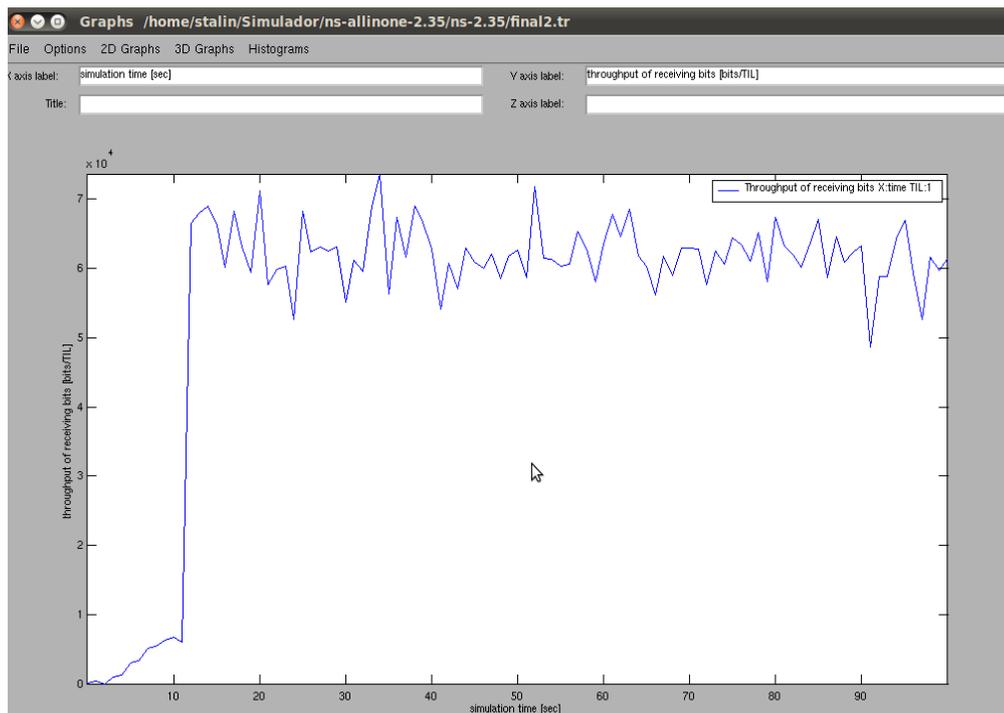


Figura. 52. Throughput de bits recibidos.

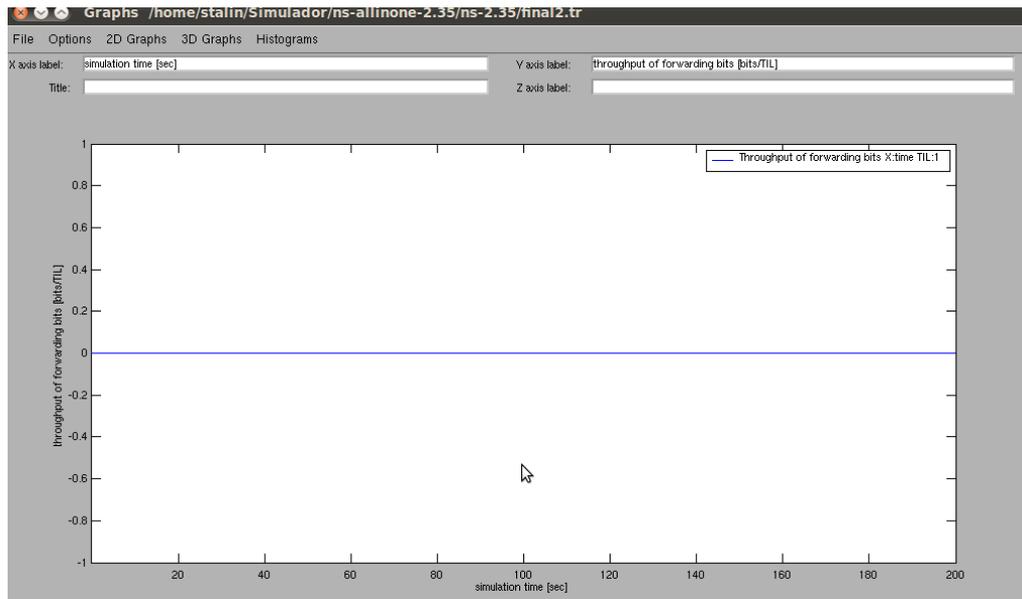


Figura. 53. Throughput de bits reenviados.

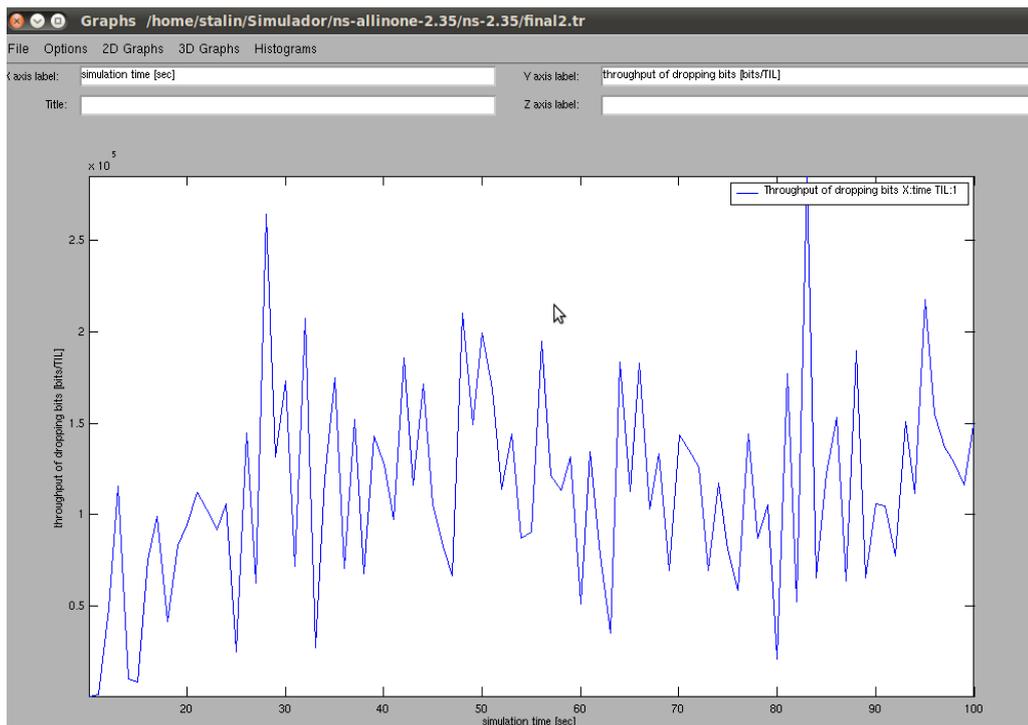


Figura. 54. Throughput de bits caídos.

Para el análisis del parámetro Delay End-To-End, Se tomó los valores del Network Information de la herramienta TraceGraph, En la Tabla.28, muestra los datos obtenidos.

Tabla. 28. Resumen de los resultados de la simulación.

Delay End-To-End	
Retardo Mínimo	0.000352033
Retardo Máximo	0.104352089
Retardo Promedio	0.002865202506

Análisis de Delivery Ratio de la red

Este análisis permite determinar el congestionamiento que se produce en la red, ya que este parámetro tiene una gran importancia en el desempeño de los paquetes que se generan. Para su cálculo se lo hace a través de la siguiente ecuación.

$$Delivery Ratio = \frac{Número\ de\ Paquetes\ Recibidos}{Número\ de\ Paquetes\ Enviados} * 100\% \quad (3.34)$$

$$Delivery Ratio = \frac{49617}{49724} * 100\%$$

$$Delivery Ratio = 99.784 \%$$

La Tabla.29, muestra un resumen de los datos analizados en Delivery Ratio.

Tabla. 29. Resumen de valores de Delivery Ratio.

Delivery Ratio	
Número de Nodos	8
Número de Paquetes Enviados	49724
Número de Paquetes Recibidos	49617
Porcentaje Delivery Ratio	99.784

La Tabla.29, nos muestra que el número de paquetes enviados es mayor al número de paquetes recibidos, sin embargo, la diferencia que existe entre estos valores no es muy grande, Delivery ratio es favorable.

Análisis de la Cantidad de Paquetes

El análisis de la cantidad de paquetes es un parámetro importante, ya que este valor tiene un comportamiento diferente en cada red. Este análisis nos ayuda a conocer si los parámetros establecidos son los adecuados, como también saber si el modelo de propagación escogido es el correcto.

La Tabla.30, y las Figuras 55, 56 muestran el número de paquetes generados, enviados, recibidos, perdidos y caídos de la simulación.

Tabla. 30. Número de Paquetes.

PAQUETES	
Número de Nodos	8
Número de Paquetes Enviados	49724
Número de Paquetes Recibidos	49617
Número de Paquetes Generados	52059
Número de Paquetes Perdidos	107
Número de Paquetes Caídos	11509

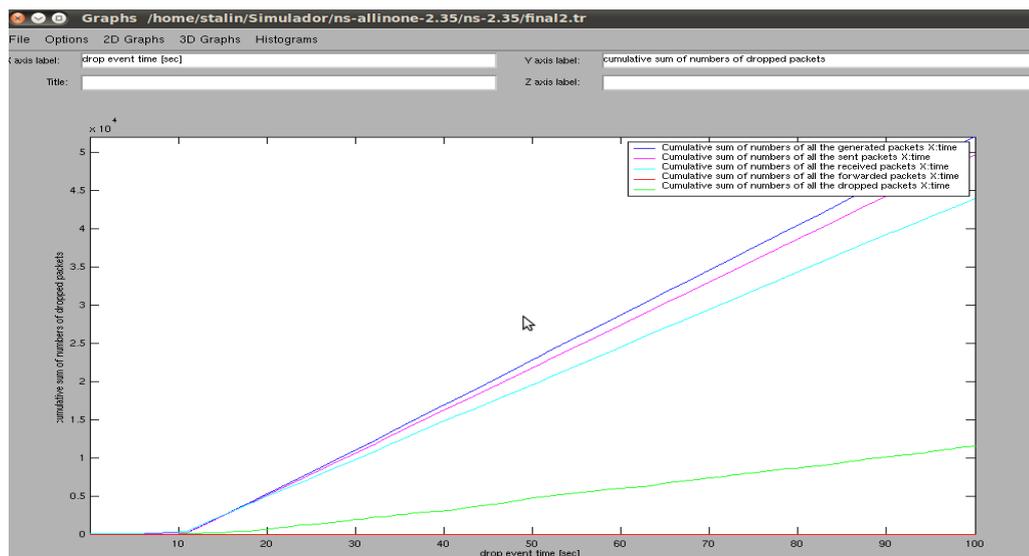


Figura. 55. Número de Paquetes.

Para nuestra simulación se generaron 52059 paquetes, de estos se enviaron 49724 paquetes. Sin embargo, la cantidad de paquetes que llegaron a su destino son un total 49617 paquetes, por lo que una parte de los paquetes enviados fueron caídos o perdidos. El número de paquetes caídos son 11509, esta falla se produce cuando un paquete no puede ser entregado, ya que los almacenadores intermediarios se encuentran llenos, esto puede hacer que el receptor solicite un retransmisión de dicho paquete. Por último el número de paquetes perdidos es de 107, esto se debe a que nunca llegaron a su destino debido a fallas en el sistema,



Figura. 56. Análisis del Número de Paquetes.

El gráfico anterior, nos muestra que en base al porcentaje de paquetes generados el porcentaje de paquetes enviados es el que corresponde al valor más alto y que los porcentajes de paquetes de caídos y perdidos son pequeños, por lo que el desempeño de nuestra red es favorable.

Análisis Jitter de los paquetes recibidos

El Jitter de los paquetes recibidos que se producen entre los nodos oscila entre -20 y los 20 milisegundos manteniéndose hasta el final de la simulación.

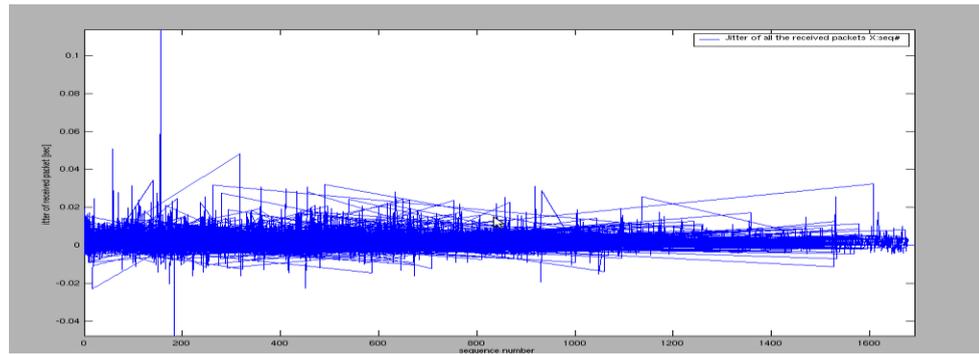


Figura. 57. Jitter de Paquetes Recibidos.

3.10 Tipo de sensores o módulos de comunicación

En los últimos tiempos, la tecnología TIC ha desarrollado varias soluciones en el ámbito del medioambiente, la seguridad, la construcción, sistemas de transporte, seguridad, las cuales están diseñadas en redes WSN, que por la característica de estas permiten tener un monitoreo en tiempo real e integración de dispositivos (mote's), creando una entornos inteligentes que pueden estar formados por múltiples nodos dentro de una determinada área.

La arquitectura de nuestra red de sensores está conformada por:

Hardware

- ✓ Nodos MPR2400
- ✓ Sensores MTS310 (Sismisidad, temperatura, magnetómetros, luz, acústico)
- ✓ Estación Base MIB520CB (Gateway)
- ✓ Procesador/Radio
- ✓ Tarjeta de Programación USB.
- ✓ Antenas GPS

3.11 Sistemas de alimentación

La aplicación de red de sensores inalámbricos está enfocada para ambientes donde es posible que carezca de servicios de energía eléctrica, por esta razón se opta por la utilización de baterías ya que facilitan las tareas de despliegue y cambio de posición de un nodo. Los siguientes tipos de baterías se utilizan con frecuencia para alimentar la WSN.

Niquel-Cadmio (Ni-Cd): Es un compuesto basado por hidróxido de níquel, hidróxido de potasio y cadmio metálico. Tienen ciclos de vida múltiples, su mayor desventaja es que generan una baja tensión. Su característica principal es que pueden ser recargadas más de 1000 veces y alcanzar a durar varios años.

Niquel Metal Hydride (Ni-Mh): Presentan una alta densidad de energía, lo que implica un mayor tiempo de vida. Además es menos contaminante que el compuesto anterior Ni-Cd, en comparación con el sistema anterior entrega un 30% más de energía y poseen el mismo tamaño.

Litio: Posee un tamaño compacto en comparación con las demás baterías (8.5cm³), la energía generada es de tres veces más que la típica pila de alcalina, considerando su tamaño equivalente, posee un voltaje mayor de 3 volts contra 1.5 volts, su inconveniente es su costo elevado.

Litio-Ion: Este sistema es recargable hasta 1000 veces. Su costo es mucho más barato ya que posee óxidos que son muy comunes y variados en la corteza terrestre.

En cuanto a lo que se refiere ya a la implementación y despliegue del sistema, no se tiene un tipo específico de batería, la selección del sistema de alimentación depende de las posibilidades de adquisición en el mercado local, aunque teóricamente se prefieran las de tipo recargable y con una capacidad de

corriente mayor, esto tiene una gran influencia en el tiempo de funcionamiento sea más extenso.

Como las tensiones de los elementos principales de los motores tienen que estar comprendidas entre 2,1 y 2,6V, y todas las baterías mencionadas anteriormente ofrecen una tensión de unos 3V cuando están totalmente cargadas, son necesarios elementos adicionales para regular la tensión procedente de la batería. En concreto, la tensión se reguló a 2,5V con el regulador lineal de tensión. La mayoría de los sensores seleccionados funcionan correctamente con una alimentación de 12V. Por ello, se utilizaron convertidores continua/continua para elevar la tensión de la batería hasta los 12V necesarios. A continuación se muestran algunos tipos de baterías.

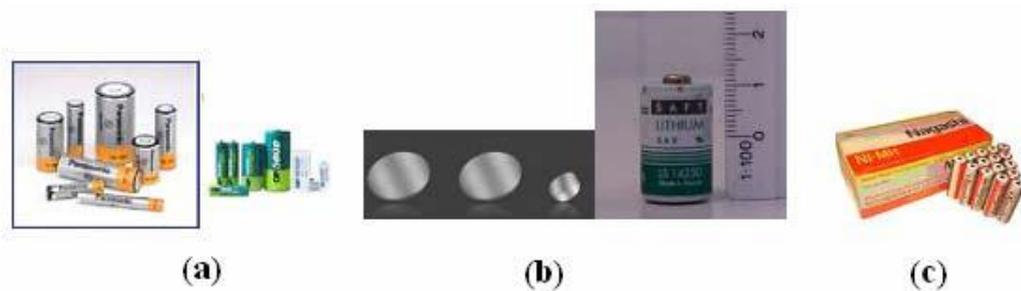


Figura. 58. Tipos de baterías a) Niquel Cadmio, b) Litio, c) Niquel Metal Hydride.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS POSIBLES DISPOSITIVOS Y MÓDULOS QUE SE PODRÍAN UTILIZAR

4.1 Tecnología MICAZ (HEREDIA, 2008) (Marquez, 2007)

Para la elaboración de este proyecto se realizara una investigación de la tecnología MicaZ siendo una alternativa para su implementación, ya que posee una de las mejores arquitecturas de dispositivos en el mercado.

Los nodos MicaZ tienen un chip de la empresa CHIPCOM modelo CC2420, su funcionamiento está regido por la norma IEEE 802.15.4, Este estándar posee una norma que define el nivel de acceso físico y de control de acceso al medio, en redes inalámbricas de área personal, con tasas de transmisión de datos bajas, lo que es beneficioso para nuestro estudio. Por otro lado tiene un microcontrolador ATMEGA128L, de bajo consumo, en el cual se puede ejecutar programas desde la memoria flash interna que posee.

Los dispositivos MicaZ son la evolución desarrollada a partir de la tecnología MICA, y al tener un conector de entrada/salida de 51 pines, existen una variedad de placas sensoras que se pueden utilizar para diferentes aplicaciones. Estos dispositivos tienen un diseño el cual funciona con alimentación de baterías, específicamente con dos baterías tipo AA, estas baterías son de tipo alcalinas con una carga de 2000 mAh. Los dispositivos admiten otro tipo de fuente siempre y cuando la alimentación este entre el rango 2.7 y 3.6 VDC.

4.1.1 Redes de bajo consumo

En una red de sensores lo más primordial es el consumo energético, sobre todo si nuestro objetivo es que el periodo de tiempo de vida de los dispositivos que conforman la WSN, sean los máximos. Teniendo en cuenta que los nodos sensores que conforman la red no estarán alimentados a una red eléctrica y su funcionamiento se basa principalmente en el suministro de baterías, para esto se intenta reducir y optimizar el consumo dentro de cada nodo. Por otro lado, hay que tener un estimado del tiempo, el cual nuestro nodo va a estar alimentado correctamente, y cuando dejara de funcionar.

Realizar un estudio del consumo de energía de una red de sensores mediante mediciones directas, puede ser muy complejo, ya que estas redes pueden estar conformadas por un numero alto de nodos y el consumo energético de cada nodo es diferente. Estas investigaciones son pocas y casi todas se basan en software de simulaciones.

Las tablas 31,32, son el resultado obtenido de un estudio del consumo de energía de este tipo de módulos inalámbricos:

Tabla. 31. Consumo del Procesador en MicaZ.

CONSUMO DEL PROCESADOR	
MODO ACTIVO	8Ma
MODO RENDIMIENTO COMPLETO	12ma (7.37MHz)
MODO SLEEP	<15µA

Tabla. 32. Consumo del Sistema de Transmisión.

CONSUMO DEL Sistema de Transmisión	
MODO RECEPCIÓN	19.7mA
MODO TRANSMISIÓN -10dBm	11mA

4.1.2 Conversión de la información (Marquez, 2007) (Juan Suardíaz Muro, Juan A. López Riquelme, Universidad Pontificia de Cartagena, Juan Jose García Heredia, 2012)

La información que se transmite desde los motes hasta la estación base, sufre varias transformaciones hasta convertirse en una información útil que pueda ser entendida por el usuario.

Se Realizará una explicación breve de algunas conversiones de los datos.

CONVERSIÓN DEL VOLTAJE DE LA BATERÍA

En todas las placas para la conversión de la lectura efectuada en la batería se lo hace con la siguiente expresión:

$$BV = \frac{RV * ADC_FS}{dato} \quad (4.1)$$

Dónde:

BV = voltaje de la batería

ADC_FS = 1023

RV = voltaje de referencia del MicaZ 1.252352 voltios

dato = es la lectura del canal 1

CONVERSIÓN DE LOS ACELERÓMETROS

Los acelerómetros en las placas sus valores vienen dados mV. Los acelerómetros ADXL202E tienen una sensibilidad aproximada de 167mv/g.

$$\text{AcelX} = \text{AcelY} = \frac{\frac{(\text{calplus}-\text{calmi})}{2} - (\text{calplus}-\text{dato})}{\frac{(\text{calplus}-\text{calmi})}{2}} \quad (4.2)$$

Donde los valores calplus y calmi son valores provenientes de la calibración del acelerómetro. La salida de los acelerómetros está dada en g.

EJEMPLO DE LA CONVERSIÓN DE DATOS EN UN MENSAJE

Se toma como dato el siguiente mensaje:

67 46 4A C7 00 99 00 E8 01 07 8A 22 39 7E

En la placa MTS420, los datos obtenidos son:

Tabla. 33. Datos Obtenidos en un mensaje Tipo-Ejemplo.

CAMPO	VALOR
Id	01
Vref	018D
Humedad	0376
Temp	1908
Calibración de Palabras	AEOE.B298.AD67.B5CF
Intersematemp	67A8
Intersemapressure	4A46
Taosch0 y taosch1	00C7.0099
accel_x y accel_y	01E8.078 ^a
CRC	2239

Convertidos los datos leídos a unidades queda:

Tabla. 34. Tabla de Datos Convertidos en Mensaje Tipo.

CONSUMO DEL Sistema de Transmisión	
node id	1
Batería	3154 mW
Humedad	29%
Temperatura	24°C
Inter. Temperatura	24°C
Inter. Precisión	1001 mbar
Luz	122.775696 lux

Continúa 

X-axis Accel	183.333344 mg
Y-axis Accel	7416.243652 mg

4.1.3 Puerta de enlace y estación base

PUERTA DE ENLACE

Dentro de una red es importante que exista un dispositivo, que sea capaz de recoger las lecturas realizadas por las motas y almacenarlas posteriormente. Teniendo en cuenta de esta necesidad, el elemento que realiza estas operaciones dentro de la red, se lo conoce como puerta de enlace, la tarjeta de la familia MicaZ es la siguiente Stargate SPB400 de Crossbow.



Figura. 59. Stargate SPB400.

En esta tarjeta viene instalado el sistema operativo Linux, donde se ejecuta un código para captar los datos enviados por los motes. Luego de ser captados los datos, estos son analizados y guardados en una base de datos para su posterior uso.

El dispositivo Stargate puede conectarse con el exterior, es decir a una red local o al internet, lo que hace que los datos estén disponibles en cualquier lugar.

ESTACIÓN BASE

Los datos recogidos por el gateway son filtrados, analizados y enviados a un servidor externo donde se dispone de una base de datos para su almacenamiento. Esta base de datos es accesible desde un simple sistema Web que muestra los datos almacenados de forma remota.

4.1.4 Sistemas Operativos compatibles (Marquez, 2007)

TINYOS

Es un sistema operativo diseñado para sistemas inalámbricos empotrados, su principal característica es que utiliza poca memoria y maneja múltiples tareas y eventos. Posee una plataforma de código abierto, que fue desarrollada a partir de la tesis Doctoral de Jason Lester Hill, quien fue estudiante de la Universidad de California, Berkeley, en el año 2003.

La dinámica del sistema TinyOS, es que los programas que corren bajo este, están conducidos por tareas que pueden ser interrumpidas para atender eventos, ya que estos tienen una mayor prioridad para ser ejecutados. También este posee una cola donde se guarda todas las tareas que se deben realizar. Y en el caso que el nodo no tenga ninguna tarea entra en el modo standby para un ahorro de batería.

Los programas son llamados a través de tareas, los cuales poseen un evento que indican la finalización del proceso, esto se lo conoce como operaciones split-phase. En cambio otros se inician y se activan cada vez que realizan algún proceso para lo cual han sido programados, como puede ser la recepción de un paquete. Muchas operaciones de bajo nivel son gestionadas por el sistema operativo y así nos permite centrarnos en la aplicación.

Se puede decir que el sistema TinyOS es como una pirámide, en la que en los niveles bajos encontramos los componentes del sistema, y en los superiores se encuentran los componentes de uso frecuente, que son llamados de forma implícita, y están encapsulados.

TinyOS, está conformado por tres clases de programación:

✓ Los comandos, son procesos que van de arriba hacia abajo, como indica la Figura.60, lo que quiere decir, cuando llama a un comando, este dentro de su componente, llama a otros componentes de capas inferiores.

✓ Los eventos, tienen un proceso inverso al de los comandos, es decir un componente de bajo nivel avisa a uno de alto nivel que ha sucedido algo. Si sucede un evento, éste tiene mayor prioridad que cualquier tarea y pasaría a ejecutarse. Por otro lado, un evento expulsa a otro evento debido a que existe una única pila compartida por todos los contextos de ejecución.

✓ Las tareas, son porciones de código que se ejecutan de forma asíncrona siempre y cuando la CPU no tenga que ejecutar ningún evento. Estas se ejecutan en un orden de pila (FIFO), y si la pila se encuentra vacía esta pasa a modo standby hasta que un nuevo evento haga despertar al procesador. En la primera versión la longitud de la FIFO es de 7 tareas.

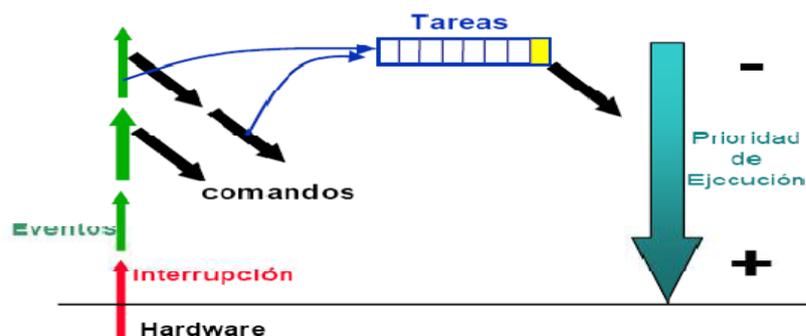


Figura. 60. Esquema Funcional de TinyOS.

Cuando se programa y compila una aplicación, siempre van unidos de forma implícita al sistema operativo, es decir que no existe un sistema operativo previamente cargado, tampoco un programa compilado, sino un conjunto de ambos que son cargados al sistema empujado, esto se presenta también cada vez que se requiera actualizar el programa y su tamaño en bytes.

Para programar en TinyOS se necesita una extensión del lenguaje C, llamado nesC, teniendo la facilidad de utilizar las interfaces que van conectadas a los componentes. Para crear un programa en este lenguaje, se debe escoger los componentes (las partes funcionales) previamente programadas, para luego mediante otro fichero de configuración “linkarlos” en la aplicación, finalmente se puede cargar la aplicación, lo que se denomina wiring.

La Figura.61, muestra un diagrama de bloques, explicando el proceso de compilación usando TinyOS. La primera parte es donde se compila la aplicación desarrollada en nesC, junto con las librerías y el kernel de TinyOS. El proceso se inicia con la generación de un fichero, que a la par con TinyOS, vuelve a compilarse a través del compilador C, el cual genera un fichero ejecutable.

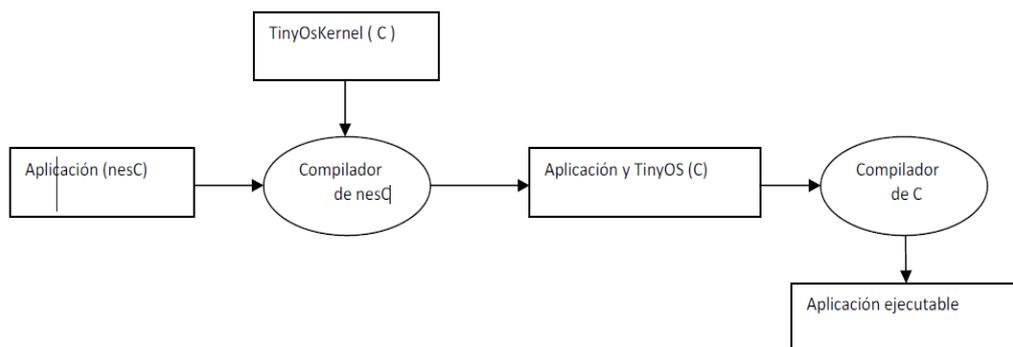


Figura. 61. Diagrama de Componentes en el Proceso de Compilación de una Aplicación WSN.

OTROS SISTEMAS OPERATIVOS (Marquez, 2007)

Existen otros sistemas operativos con los que se puede programar las motas. A continuación se redacta brevemente algunos de los más importantes:

✓ Contiki; Está diseñado para sistemas embebidos con escasa memoria. Una configuración típica de Contiki consta de 2 KB de RAM y 40 KB de ROM. Consiste en un núcleo orientado a eventos. Hace uso de protothreads, sobre el que los programas son cargados y descargados dinámicamente. También soporta una librería multithread por proceso, la comunicación entre procesos se la realiza mediante el paso de mensajes a través de eventos, al igual que un subsistema GUI opcional, el cual puede usar un soporte directo de gráficos para terminales locales, terminales virtuales en red mediante VNC o sobre Telnet.

✓ Bertha (pushpin computing platform): Se trata de una plataforma de software diseñada para poder modelar, testear y desplegar múltiples nodos idénticos que conformen una red de sensores distribuida. Sus funciones principales están dirigidas sobre todo, a administrar procesos, manejar estructuras de datos y proporcionar una interfaz de red.

✓ CORMOS; Communication Oriented Runtime System for Sensor Networks, se trata de un sistema operativo específico para redes de sensores inalámbricas.

✓ MagnetOS: Es un sistema operativo distribuido que se lo utiliza en redes de sensores o ad-hoc, cuyo objetivo es ejecutar aplicaciones de red que precisen de un bajo consumo de energía, que sean adaptativas y muy fáciles de implementar.

✓ MANTIS; Multimodal Networks In-situ Sensors, es un sistema operativo para nodos sensores.

✓ LiteOS: Sistema operativo que se desarrolló en principio para calculadoras, pero que posteriormente ha sido también utilizado en redes de sensores.

4.2 Tecnología IMOTE2 (HEREDIA, 2008)

Es una tecnología nueva para el desarrollo de redes de sensores inalámbricas, esta familia posee un mayor número de características y variedad de dispositivos que con una estructura más avanzada. Su desventaja es que posee una gama menor de placas en el mercado que se acoplen a su esquema, como pueden ser las de los sensores.

El Intel mote 2, es una plataforma que está construida por un procesador de bajo consumo PXA271 Intel XScale, opera en voltajes (0.85 v) y una frecuencia baja (13 Mhz). Tiene 256 de memoria SRAM dividida en 4 bancos de 64kB.

El procesador PXA271, es un módulo multichip, que está integrado por tres chips en un mismo paquete, posee 32MB de SDRAM y flash, y varias opciones de I/O. También tiene un chip de radio comunicación ChipCon 2420 que trabaja bajo el estándar IEEE802.15.4, una antena de 2.4GHz, que soporta transmisiones de 250 kb/s con 16 canales en la banda de 2.4 GHz, esta antena brinda un rango nominal de cobertura de 30metros.



Figura. 62. Plataforma Imote2 (Intel mote 2).

4.2.1 Placa sensora

Esta placa fue desarrollada por el laboratorio Intel Research y licenciada por Crossbow, la placa ITS400, está diseñada para interactuar con la plataforma Imote2. Tiene un acelerómetro de tres ejes (ST Micro LIS3L02DQ 3d 12 bit +-2g), un sensor avanzado de temperatura y humedad (Alta precisión, +-3°C Sensirion SHT15), un sensor de luz (TAOS TSL2651) y un convertidor analógico digital de cuatro canales (Maxim MAX1363).

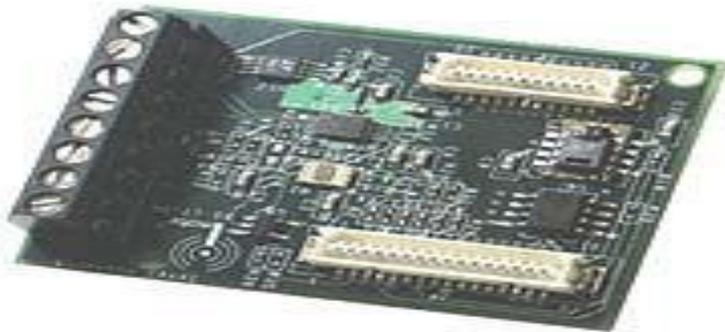


Figura. 63. Placa Sensora para Imote2.

4.2.2 Gateway

Esta placa está diseñada para poder conectarse mediante cable USB o JTAG al Imote2, con esto podemos conectar la PC al Imote2.



Figura. 64. Placa de Desarrollo y Conexión para Imote2.

La ventaja que tiene esta placa es de trabajar bajo el sistema operativo LINUX, lo que se facilita realizar una conexión directa entre la PC y el Imote2, utilizando un driver que emula una conexión IP.

4.2.3 Sistemas Operativos compatibles

La tecnología Imote2 es compatible con varios sistemas donde puede correr nuestras aplicaciones sin ningún problema.

Estas aplicaciones son:

- ✓ TinyOS 1.x: Este es el software original desarrollado para Imote2, y con la que los usuarios están más familiarizados. Tiene un gran número de características y es muy estable, en cuanto se refiere a las aplicaciones que se ejecutan en el. Soporta redes de bajo consumo, la programación se la carga a través del conector USB que viene para la versión que no soporta .net. Es un sistema que tiene una curva de aprendizaje con una pendiente elevada.

- ✓ TinyOS 2.x: Es un software libre que tiene menos características, el cual no se encuentra validado por completo su buen funcionamiento como la versión anterior. No soporta el cargador de TinyOS y necesita un cable JTAG para ser programado. Pero sobre todo esto se puede decir que este software todavía tiene una curva de aprendizaje con una pendiente elevada.

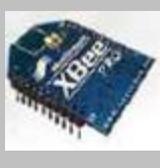
- ✓ SOS 1.x: Este sistema operativo está siendo usado por la gente de la Universidad de Yale. Se necesita un cable JTAG para programar.

- ✓ Linux: La versión basada en el Kernel 2.6 está disponible para este dispositivo, y su uso bajo este software cada vez es mayor, este sistema comparado con TinyOS tiene un mayor consumo pero las características disponibles son más estándares. Requiere de un cable JTAG para el flasheo inicial del kernel de Linux, después de esto la transferencia de datos y programas es vía USB.

✓ .NET: Este es el más adecuado, para quienes están familiarizados con las herramientas Microsoft MS .NET Framework y Visual Studio. Es agradable GNU para el usuario, en el entorno de programación. Tiene un mayor consumo de energía de TinyOS, y una menor velocidad en ejecución. Y necesita de un sistema especial para poder cargar datos vía USB, para la versión .net.

El sistema operativo que tiene más opciones para trabajar con dispositivos Imote2 es LINUX, puede que tenga un menor número de características de red inalámbricas que los otros sistemas, pero es un sistema más estable en comparación a los otros que compensa esta la desventaja.

Tabla. 35. Características Generales de los Distintos Tipos de motes.

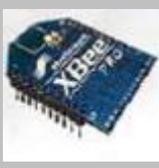
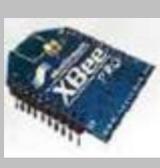
DESCRIPCION	MICAZ	IMOTE2	XBEE-PRO 802.15.4 OEM RF MODULES v1.xAx	XBEE-PRO ZIGBEE OEM RF MODULES v8x17 veta
FOTO				
ESTÁNDAR	IEEE 802.15.4	ZIGBEE	IEEE 802.15.4	ZIGBEE
TOPOLOGIA	1 ESTRELLA/MALLA	3 ESTRELLA/ARBOL	1 ESTRELLA/ARBO L	2 ESTRELLA/MALLA
MAX NUMERO DE MOTAS	2.25 65,533 NODOS	1.25 65,533 NODOS	1.25 65,533 NODOS	2.25 65,533 NODOS
MAX CARGA DE PAQUETES	2 100 BYTES	2 100 BYTES	2 100 BYTES	1
INTERFAZ	2 ANALOG INPUT, DIGI I/O, I2C, SPI, UART	2 Opios 2x, SPI 3x, UART, I2C, USB	2 ANALO INPUTA(7), DIGI I/O(9), UART	1 UART
	3	3	3	1

Continúa →

SEGURIDAD	PROTOCOLO MAC-802.15.4, ENCRIPCIÓN (AES-128)	PROTOCOLO MAC-802.15.4, ENCRIPCIÓN (AES-128)	ENCRIPCIÓN 128 BITS-AES	ENCRIPCIÓN 128 BITS-AES
	3	3	3	3
RF-DATA RATE	250 KBPS	250 KBPS	250 KBPS	250 KBPS
	3	3	3	3
COSTO APROX	130 \$	300 \$	25 \$	25 \$
	1	1	2	2
TOTAL	17.25	18.25	16.25	15.25

La Tabla.35, muestra los requerimientos de energía de distintos tipos de nodos sensores.

Tabla. 36. Requerimientos de Energía para los Distintos Tipos de nodes.

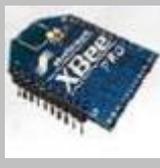
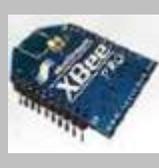
DESCRIPCIÓN	MICAZ	IMOTE2	XBEE-PRO 802.15.4 OEM RF MODULES v1.xAx	XBEE-PRO ZIGBEE OEM RF MODULES v8x17 veta
FOTO				
POTENCIA DE TX(dBm)	0-(-25)	0-(-25)	10,12,14,16	10,12,14,16
CORRIENTE OPER.	TX:17.4Ma, RX:197mA, CPU:8mA	TX:44Ma, RX:31mA, CPU:3.1mA	TX:215Ma, RX:55mA, CPU:6.5mA	TX:215Ma, RX:55mA, CPU:6.5mA
CORRIENTE SLEEP	1@3.0V , 1uA, cpu<15uA	1@3.0V , 1uA, cpu<15uA	1@3.0V , 1uA, cpu<15uA	1@3.0V , 1uA, cpu<15uA
SENSIBILIDAD RX	-94 dBm	-94 dBm	-100 dBm	-100 dBm
SUMINISTRO-VOLTAJE	3.0 V	4.5 V	3.4 V	3.4 V
INDOOR DISTANCIA	2 INDOOR/URBAN HASTA 30m	1 INDOOR/URBAN HASTA 30m	1 INDOOR/URBAN HASTA 100m	1 INDOOR/URBAN HASTA 100m
OUTDOOR	1 OUTDOOR	1 OUTDOOR	1 OUTDOOR HASTA	1 OUTDOOR

Continúa →

DISTANCI A	HASTA 100m	HASTA 100m	1000m	HASTA 1000m
	1	1	2	2
TOTAL	4	3	4	4

La Tabla.36, recoge las características de programación de diferentes tipos de nodos sensores.

Tabla. 37. Características Programación de los Distintos Tipos de notes.

DESCRIPCION	MICAZ	IMOTE2	XBEE-PRO 802.15.4 OEM RF MODULES v1.xAx	XBEE-PRO ZIGBEE OEM RF MODULES v8x17 veta
FOTO				
LENGUAJE	LENG. nesC	C# MICRO FRAMEWORK	C	C
PLATAFORMA	LINUX	VISUAL STUDIO	CODE WARRIOR	CODE WARRIOR
IDE PROGRAMABLE	SI	SI	SI	SI
SIMULADOR	SI	SI	SI	SI
DEPURACION	SI	SI	SI	SI
ACCESO POR PUERTO	SI	SI	NO	NO
ADMINISTRAD OR AUTOMATICO DE MEMORIA	NO	SI	NO	NO
ADMINISTRAD OR DE ERRORES CON ECEPCION	NO	SI	NO	NO
TOTAL	4	6	3	3

La Tabla.37, muestra el rendimiento de diferentes tipos de nodos sensores.

Tabla. 38. Rendimiento de los Distintos Tipos de motes.

DESCRIPCION	MICAZ	IMOTE2	XBEE-PRO 802.15.4 OEM RF MODULES v1.xAx	XBEE-PRO ZIGBEE OEM RF MODULES v8x17 veta
FOTO				
TAMAÑO CON BATERIA	5.2x3.2x0.7 cm	3.6x4.8x0.9 cm	2.43x3.29x0.09 cm	2.43x3.29x0. 09 cm
PESO CON BATERIA	18g	12g	4g	4g
TEMPERATUR A OPERACIONA L	0 a 85°C	0 a 85°C	40 a 85°C	40 a 85°C
FRECUENCIAS QUE OPERA	BANDA FRECUENCI A ISM 2.4- 2.4805 GHz RANGO DE MOCULACI ON 2.405- 2.480 GHz QPSK SPREAD SPECTRUM DSSS	BANDA FRECUENCIA ISM 2.4-2.4805 GHz RANGO DE MOCULACION 2.405-2.480 GHz OQPSK SPREAD SPECTRUM DSSS	BANDA FRECUENCIA ISM 2.4-2.4805 GHz RANGO DE MOCULACION 2.405-2.480 GHz QPSK SPREAD SPECTRUM DSSS	BANDA FRECUENCI A ISM 2.4- 2.4805 GHz RANGO DE MOCULACI ON 2.405- 2.480 GHz QPSK SPREAD SPECTRUM DSSS

Las dos tecnologías expuestas en el apartado anterior son soluciones hardware de bajo consumo que cumplen con el estándar 802.15.4 para WSN. Sin embargo ambas familias no podrían ser válidas para nuestro proyecto, ya que influyen más variables como el costo, tamaño, o la memoria. Incluso el término inglés “low-power” son muy relativos, según la referencia que se tome.

La plataforma Imote2, no cumple con el perfil para nuestra aplicación en base a factores como son, lo económico, eficiencia y bajo consumo, ya que el consumo de energía en modo activo es mucho mayor que la plataforma MicaZ.

La solución para el prototipo está encaminado a la familia Crossbow: MicaZ. Teniendo en cuenta que la debilidad de esta tecnología está en la

capacidad de memoria RAM, que puede ser un aspecto de diseño crítico, ya que en caso de que sea muy reducida podría acotar el volumen de código introducido en el nodo y, en consecuencia, las prestaciones necesarias en el sistema podrían verse disminuidas. Pero por otro los pilares importantes de MicaZ es el consumo, conjuntamente con el costo.

A partir de los datos expuestos en las tablas, podemos decir que la plataforma MicaZ es la que menos energía consume: hasta 4 veces menos en modo activo y un consumo algo menor en modo sleep, en comparación con la plataforma Imote2. Además, esta plataforma posee la memoria RAM de 4 kB, adecuada para la aplicación de monitoreo de puentes. Siendo el costo la última variable a tener en cuenta, posee un valor en el mercado aproximado de 130 dólares, Por todos estos factores hacen que sea la principal solución, para la implementación del prototipo de monitoreo de puentes.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO Y PRUEBAS

5.1 Prueba del Alcance de los Módulos de Radio.

Una vez realizada las pruebas en el simulador NS2 de la topología, se procede a realizar las pruebas físicas de los equipos en un ambiente de campo. Para esto se empleó un kit de sensores Crossbow IRIS, que abarca: Gateway MIB520, Motes con sus respectivas tarjetas de sensamiento MTS400, software MoteConfig 2.0, MoteView 2.0. La Figura.65, nos muestra todos los dispositivos que componen el kit.



Figura. 65. Kit de Sensores Crossbow IRIS.

Primero se necesita configurar los equipos de acuerdo a la necesidad de la aplicación, en este apartado únicamente se describirá los parámetros de configuración utilizados, Como la aplicación necesita de un monitoreo por

eventos los equipos estarán programados en modo de consumo hp. También como se conoce que existe un interferencia entre WiFi y Zigbee ya que ambos trabajan en la banda de los 2.4 GHz, se escogerá el canal 15.

Las plataformas usadas en la estación base y los puertos de interface del computador requeridos por el software MoteConfig 2.0; son los siguientes:

Gateway MIB520: utiliza el puerto USB, Necesita que se instale los drivers para su funcionamiento. La Figura.66, indica la configuración de la tarjeta de interface, utilizando el software MoteView 2.0, en la pestaña Settings se selecciona el Gateway, los puertos de programación y las velocidades de transmisión del puerto.

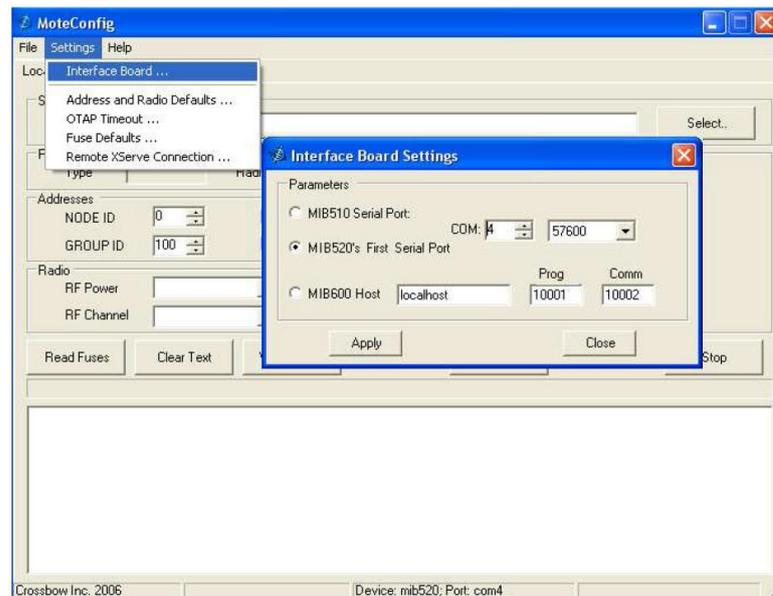


Figura. 66. Configuración de la Tarjeta de Interface.

La Figura.67, nos indica como seleccionar el firmware, para los Motes IRIS.

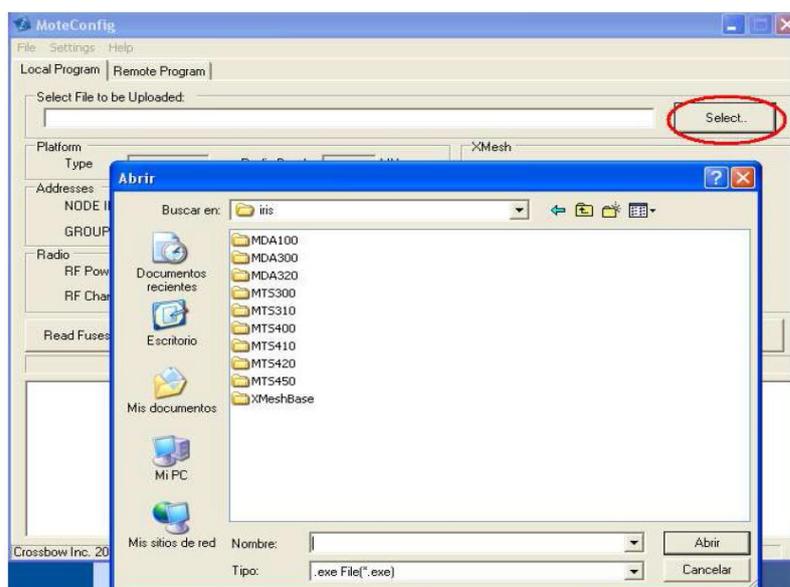


Figura. 67. Firmware de los Motes IRIS.

El firmware que se compilo en la estación base para la plataforma IRIS es (XMeshBase_M2110_hp), y los parámetros que se configuraron fueron los siguientes: Nodo ID=0; Grupo ID=100; Potencia RF=2.9dBm; Canal 15.

Seleccionados los parámetros se continúa con la programación del firmware en los Motes. La Figura.68, muestra el proceso de instalación en la estación base.

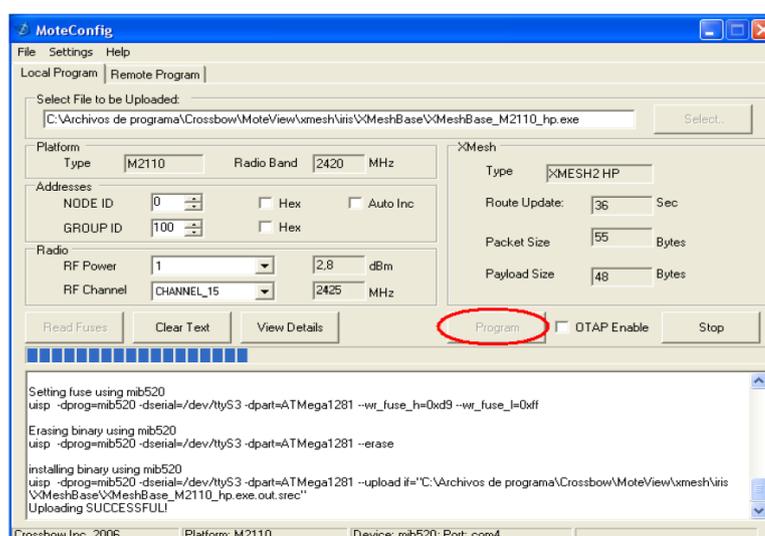


Figura. 68. Configuración de la estación base IRIS.

La Figura.69, Muestra la instalación del Firmware de los Motes IRIS, los parámetros que se configuraron fueron los siguientes: Nodo ID=1; Grupo ID=100; Potencia RF=2.9dBm; Canal 15.

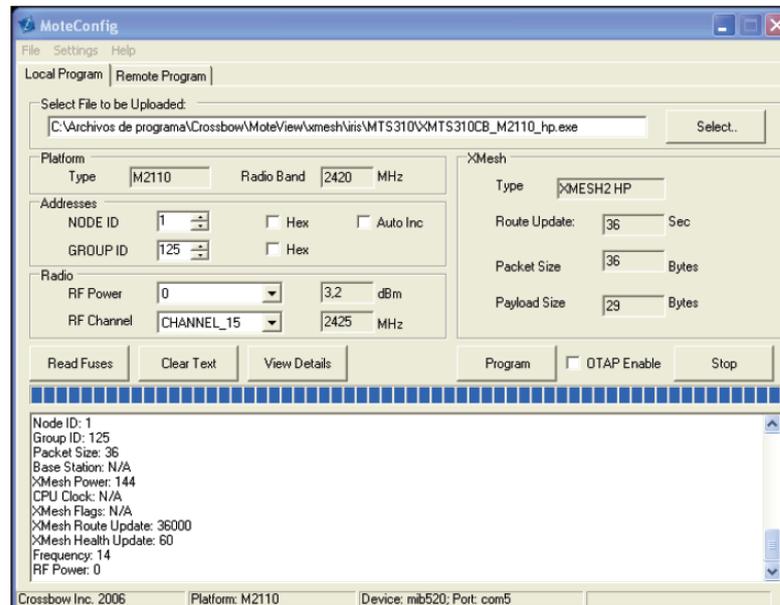


Figura. 69. Configuración de los Motes IRIS.

Una vez finalizada la programación de los dispositivos IRIS, se procede a realizar las pruebas del alcance de los módulos, La prueba se la realiza en la parte posterior de los laboratorios de Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, donde los motes son desplegados al nivel del suelo. Con el fin de determinar el alcance máximo de las motas al Gateway. Es necesario que los nodos se encuentren con LOS (línea de vista) completamente despejada, de esta manera se puede saber que al implementar en un puente estos necesiten estar ubicados fuera de obstáculos.

Se procedió a realizar la prueba, teniendo en cuenta que para tener una mejor propagación el Gateway se lo ubico en una posición alta. La ubicación de los nodos sensores se los puede observar en la Figura.70.



Figura. 70. Despliegue de los nodos y Gateway.

En la tabla.39, se muestran los resultados de las pruebas realizadas a diferentes distancias y en diferentes lugares, se contaron 15 transmisiones consecutivas.

Tabla. 39. Resultados de las pruebas realizadas.

LUGAR	DISTANCI A [m]	TRANSMISIONE S BUENAS	TRANSMISION ES FALLIDAS
CAMPUS UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE	10	15	0
	20	15	0
	40	15	0
	60	15	0
	80	15	0
	100	13	2
	110	12	3
	120	10	5

5.2 Implementación de la Red de Sensores Inalámbricos.

Para la implementación del prototipo de la red de sensores se escoge dos escenarios para su despliegue, el primero se lo realiza en el puente peatonal ubicado en la parte frontal del Campus Politécnico de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, y el segundo se establece en base a la simulación efectuada en el capítulo 3, que es el despliegue de la red de sensores en el puente "SAN PEDRO", que se encuentra en el sector del Valle de los Chillos, cerca del colegio Farina, el despliegue de los dispositivos se lo hace de forma mixta, una vez vista la auto-organización de los sensores, se ubica de forma manual el Gateway en el lugar más adecuado para efectos de energía y rendimiento.



Figura. 71. Despliegue de la Red de Sensores.

La Figura.71, nos muestra el despliegue del prototipo en el primer escenario, donde los nodos se encuentran distribuidos de forma aleatoria en la plataforma del puente peatonal, el Gateway se lo ubico en la entrada de la Garita de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, y un enlace punto-punto al edificio central utilizando equipos WiMAX. Las Figuras, 5.8, y 5.9, nos muestran la implementación de la red.



Figura. 72. Puente Peatonal, exteriores de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.



Figura. 73. Nodos sensores desplegados.

La ventaja de tener una red que se auto-organiza, se establece también una red plana, donde todos los nodos tienen el mismo rol, colaboran unos con otros para hacer la captación de eventos de forma conjunta, Por otro lado, si se tuviera una red jerárquica, la desventaja es que, no todos los nodos cumplen la misma misión ni las mismas capacidades.

Para el despliegue de los dispositivos en el segundo escenario, el puente “SAN PEDRO” se los realizó de la misma forma que en el primer escenario. La ubicación de los nodos fue de manera aleatoria con el fin de cubrir toda el área del puente y al Gateway se lo ubico de forma de que exista un ahorro de energía y un buen rendimiento de la red. La Figura.74, muestra un esquema general de la implementación de la red de monitoreo.



Figura. 74. Despliegue de la Red de Monitoreo.



Figura. 75. Puente de San Pedro-Valle de los Chillos.



Figura. 76. Despliegue de los nodos.

La implementación de la red, se la realizo de forma que se cree una red auto-organizada, para tener la ventaja, que exista una colaboración entre nodos al hacer la captación de eventos de forma conjunta.

Ambas redes de monitoreo desplegadas en los diferentes escenarios, buscan tener un control vía remota, sobre el acceso a la información de las variables adquiridas por la red de sensores inalámbricos, para lo cual tanto el computador que se encarga de la recolección local de datos, como el computador remoto, necesitan la activación de acceso remoto dentro de las propiedades de cada sistema en el panel de control, para que se pueda efectuar la asistencia remota.

El equipo remoto es el encargado de recopilar toda la información de las vibraciones sensadas y a su vez enviará hacia el equipo de recolección local o monitoreo, ubicado en el campus politécnico de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, donde se analizará toda la información adquirida, el acceso a nuestro equipo remoto será a través de un nombre de usuario y contraseña, como un método de seguridad de nuestra red. Las Figuras.77 y 78, muestran el enlace de conexión para el primer escenario.

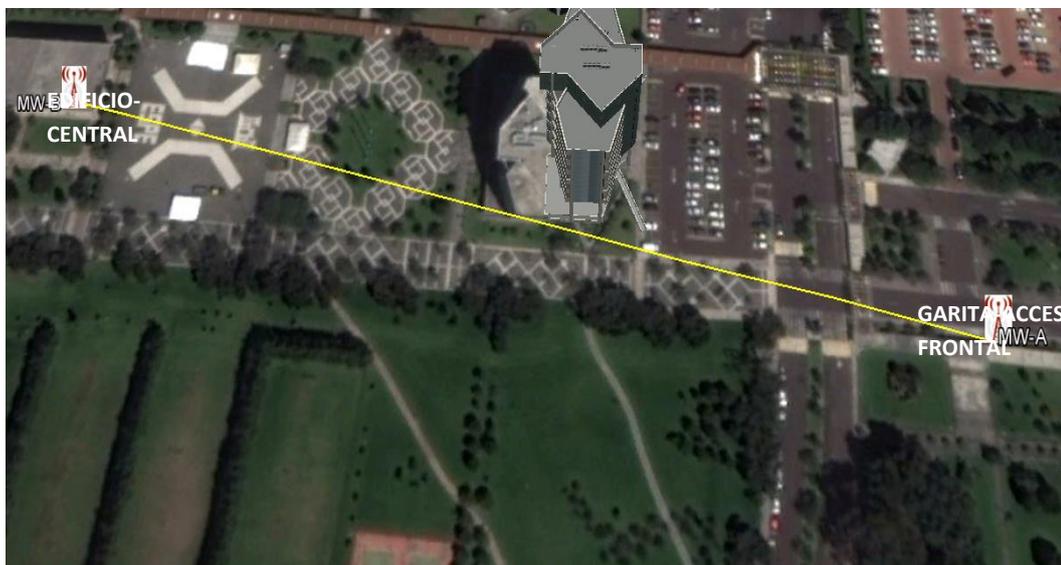


Figura. 77. Comunicación entre equipo remoto y equipo de monitoreo.



Figura. 78. Antenas Alvarion WIMAX, del enlace.

Al no existir línea de vista entre el puente “San Pedro” (donde se encuentra el punto de recolección de datos sensados del puente), y el edificio central del Campus politécnico de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (equipo de monitoreo), se opta por implementar el enlace de conexión utilizando módems GPRS, como el medio de conexión entre el equipo remoto y el equipo de monitoreo. Las Figuras.79 y 80, muestra el enlace de conexión.

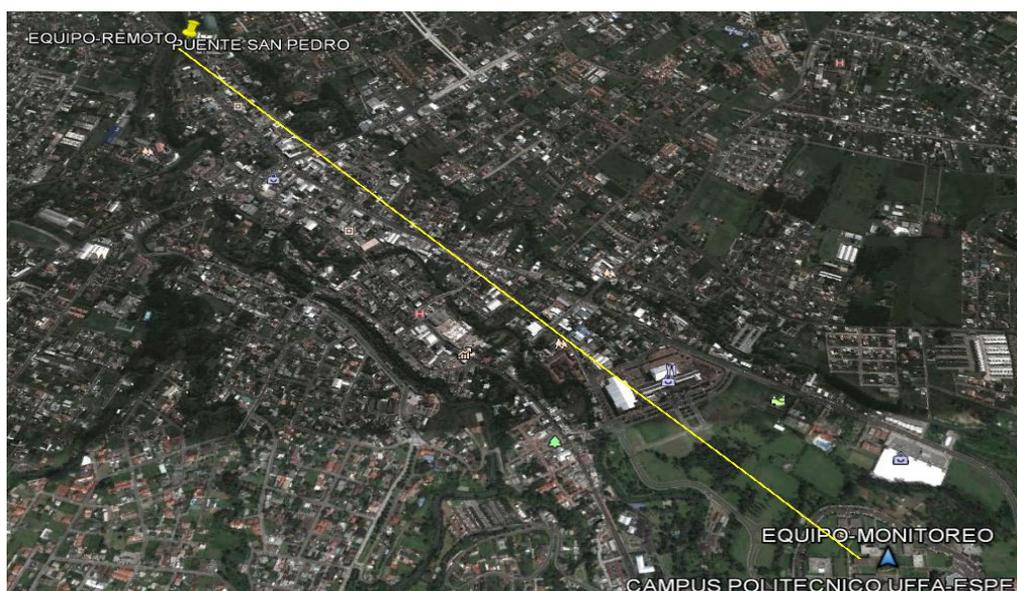


Figura. 79. Comunicación entre equipo remoto y equipo de monitoreo.

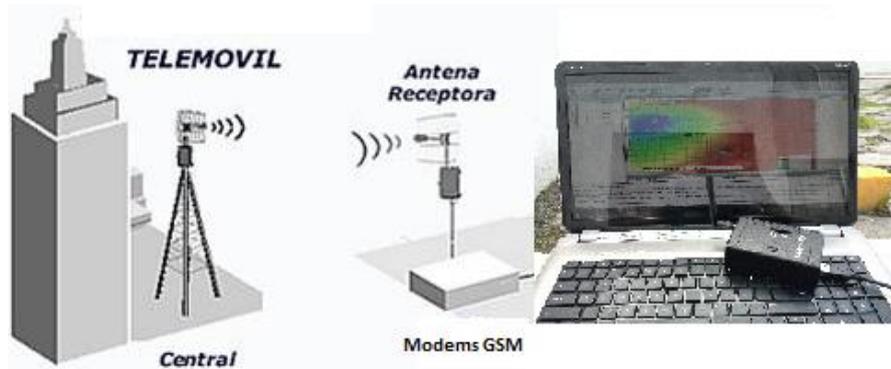
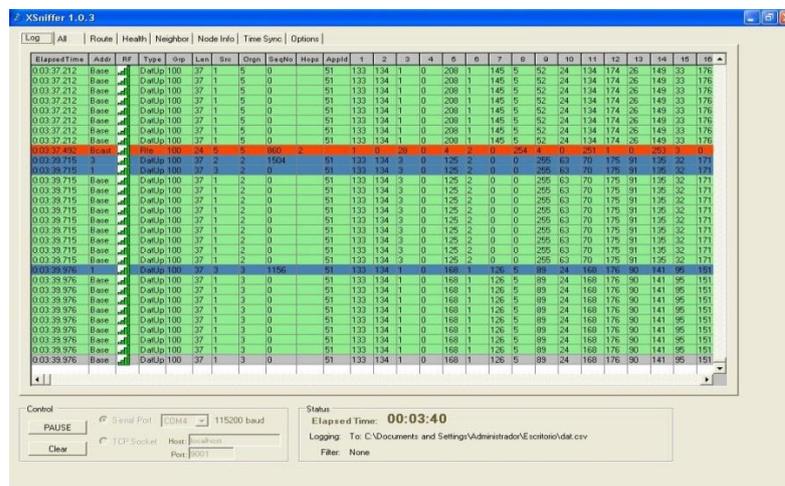


Figura. 80. Comunicación entre equipo remoto y equipo de monitoreo.

5.3 Prueba de la red de sensores inalámbricos (Heredia, 2008) (Ortega, 2012)

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de realizar pruebas del funcionamiento de la red de sensores inalámbricos en los dos escenarios que incluyen, topología de la red, costo por la mínima transmisión (MT), y la fiabilidad de la red en términos de enrutamientos de paquetes.

Como se conoce ambos escenarios cuentan con 6 nodos, que determinan el estado de la salud del puente, y uno que se encarga de recoger el tráfico asociado a la red de sensores (sniffer). La Figura.81, muestra el Xsniffer de Crossbow.



Los colores ilustrados por la herramienta Xsniffer, están vinculados al tipo de transmisiones realizadas por las motas, en las que:

- ✓ Azul: Cuando un nodo que no es la estación base envía un paquete, a un nodo.
- ✓ Rojo: Cuando un nodo sensores envía información por broadcast a los demás nodos.
- ✓ Verde: Cuando un nodo envía información directamente a la estación base.

Todos los datos que provienen de los nodos sensores son recolectados por la mota base en formato binario y con un orden dado por la estructura del mensaje. Este formato de datos es muy difícil ser visualizado. Para ello nos ayudaremos con el software Xsniffer, que nos permite:

- ✓ Lectura de todos los datos provenientes del puerto serie al que está conectado el Gateway.
- ✓ Visualización de la información, según los campos de la estructura del mensaje, que además de poder monitorear la información se puede acceder a toda la información de las aplicaciones instaladas en las mota.
- ✓ Almacenamiento de toda la información.

La Figura.82, muestra los datos de la estructura del mensaje de todas las motas ancladas. Dentro de esta información hay una parte que corresponde a la cabecera introducida por Crossbow, que ocupa los cuatro primeros bytes, es decir, que para su análisis hay que comenzar a partir del cuarto byte, también se tiene que considerar el tamaño de cada uno de los campos en la estructura del mensaje, solo los campos de Latitud/longitud y segundos ocupan cuatro columnas de (4bytes=32bits) cada columna.

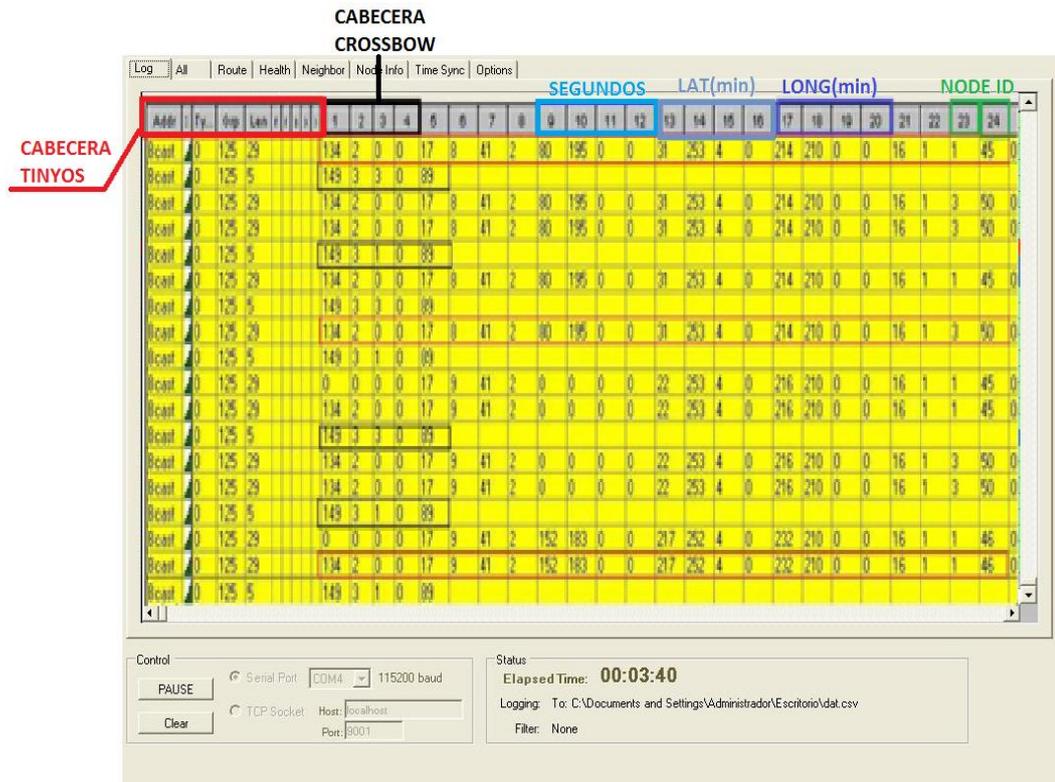


Figura. 82. Herramienta Xsniffer, captura de los mensajes de la red de sensores.

Una vez obtenidos los datos mediante Xsniffer, utilizamos la herramienta MATLAB para el tratamiento y representación de los datos.

La Figura.83 y 84, muestra los resultados obtenidos en el primer escenario, con un número total de seis nodos.

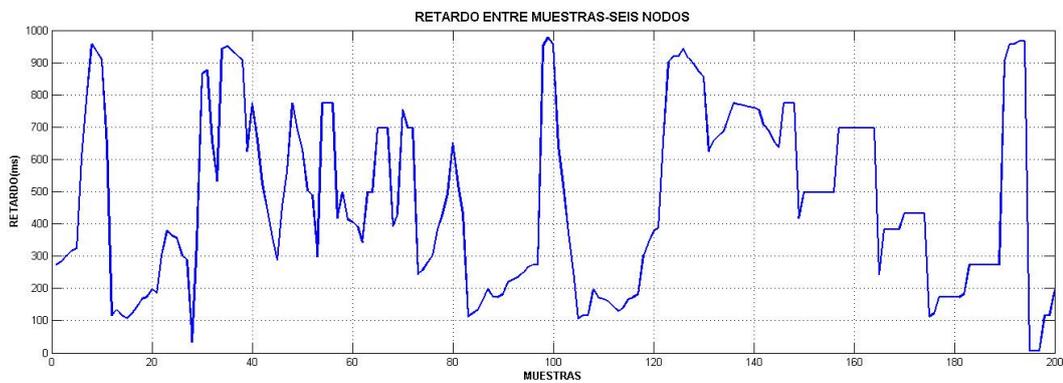


Figura. 83. Tiempo entre muestras adquiridas, Puente peatonal.

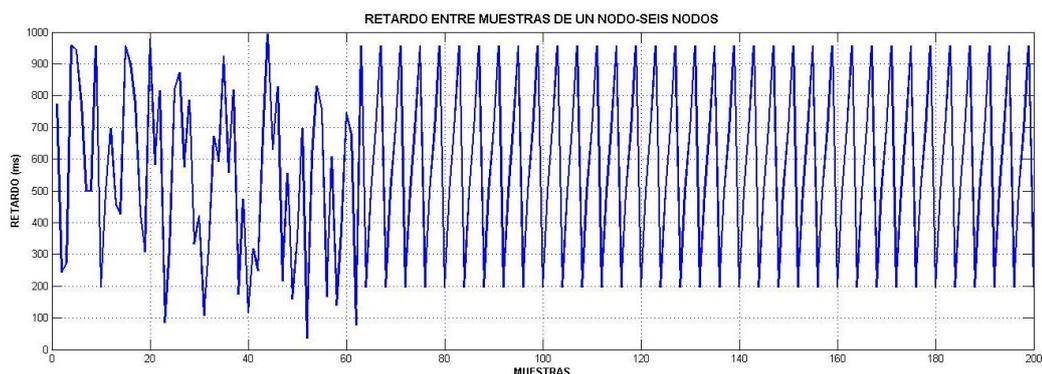


Figura. 84. Retardo de una mota dentro de la red de sensores, Puente peatonal.

La Tabla.40, es un resumen de los resultados de la implementación de la red de sensores en el puente peatonal.

Tabla. 40. Características Generales de los Distintos Tipos de motes.

TIEMPO ENTRE MUESTRAS PROMEDIO	507.53
RETARDO PROMEDIO DE UN NODO EN LA RED	573.285
PROMEDIO DE PAQUETES PERDIDOS	5.22%
PROMEDIO DE PAQUETES RETRANSMITIDOS	22.70%

La Figura.85 y 86, muestra los resultados obtenidos en el segundo escenario, con un número total de seis nodos.

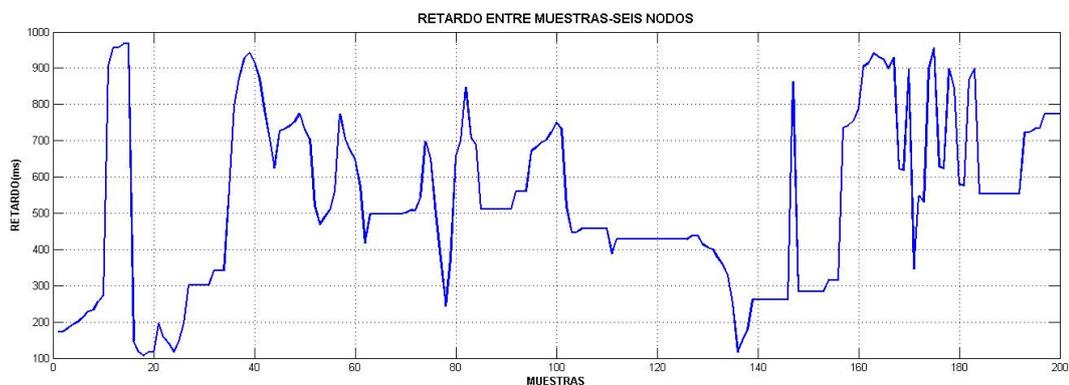


Figura. 85. Tiempo entre muestras adquiridas, Puente San Pedro.

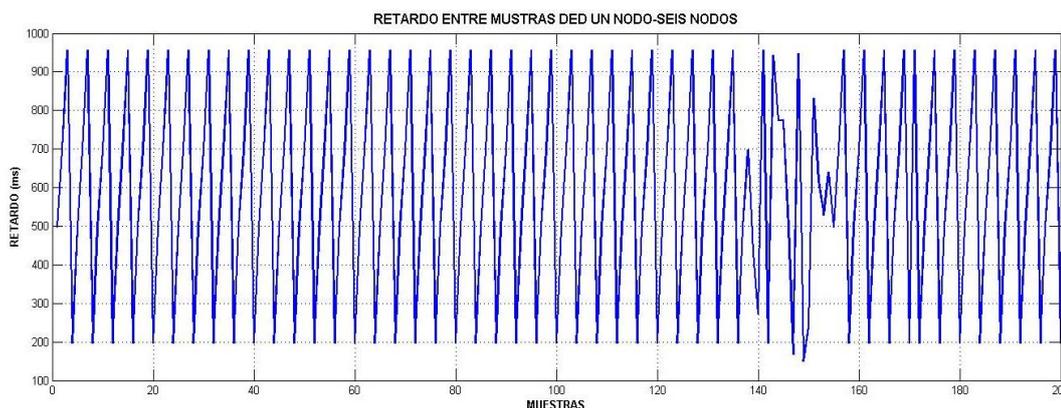


Figura. 86. Retardo de una mota dentro de la red de sensores, Puente San Pedro.

La Tabla.41, es un resumen de los resultados de la implementación de la red de sensores en el puente SAN PEDRO.

Tabla. 41. Características Generales de los Distintos Tipos de motes.

TIEMPO ENTRE MUESTRAS PROMEDIO	471.94
RETARDO PROMEDIO DE UN NODO EN LA RED	585.285
PROMEDIO DE PAQUETES PERDIDOS	36.78%
PROMEDIO DE PAQUETES RETRANSMITIDOS	25.19%

Las pérdidas de paquetes que se producen el segundo escenario son mayores que las que se obtienen en primer escenario, ya que las características de propagación obtenidas al implementar en el puente peatonal son mejores, que las logradas en el puente de San Pedro.

Utilizando la herramienta MoteView 2.0 (Crossbow_Techonologies), se puede determinar la topología de la red, la cual toma la información que contiene cada sensor y expone el similar del nodo sensor midiendo la estimación realizada por el algoritmo EWMA. Tal estimación se refiere a la calidad del enlace, es altamente variante y más, con respecto a la organización de los nodos. Las Figuras, 87 y 88, muestran las topologías obtenidas en los dos escenarios.

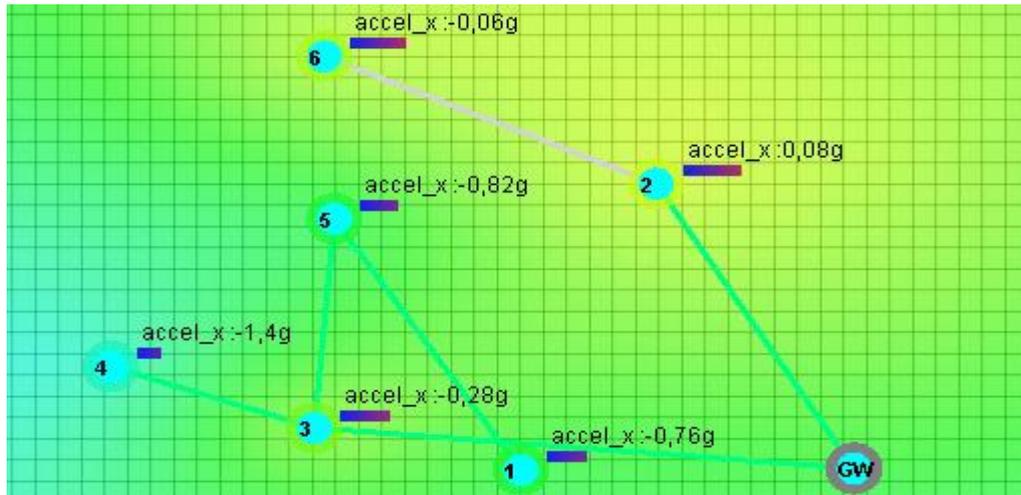


Figura. 87. Topología de la red-Puente peatonal.

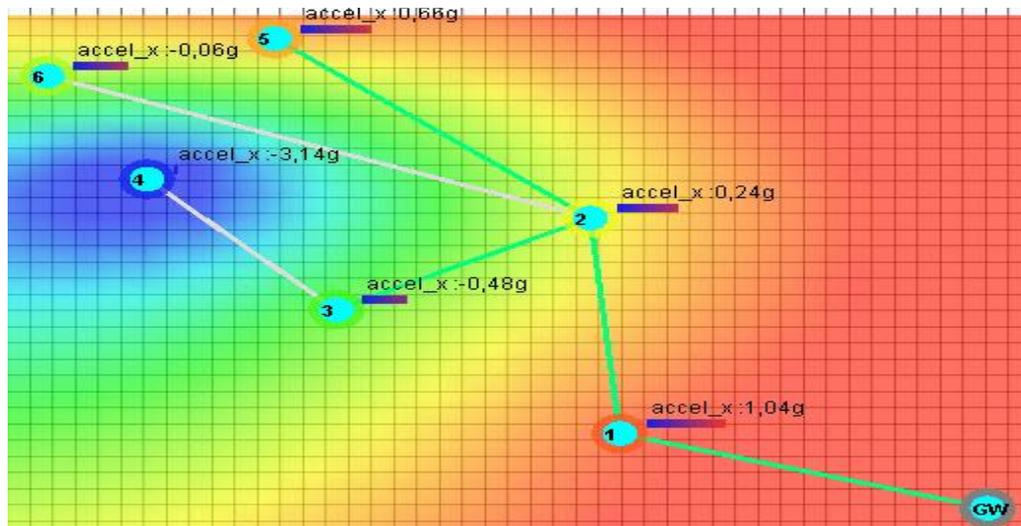


Figura. 88. Topología de la red-Puente San Pedro.

En cuanto a las topologías ilustradas, los nodos utilizan la métrica para establecer su organización y proporcionan la información de las vibraciones que se producen en los puentes.

Al realizar la evaluación de la red, se comprobó que la fiabilidad de la transmisión depende mucho de la potencia de transmisión empleada por cada nodo, como se lo observo en la pruebas del alcance de los dispositivos.

Finalmente, se obtuvo los datos de información relacionados a las vibraciones sensadas en los puentes, es en donde se puede ver la efectividad del algoritmo de mínima transmisión MT.

Esto quiere decir, el retardo de los nodos más cercanos a la estación base son mínimos, mientras que los nodos que se encuentran más alejados de la estación el coste era mayor.

Las Figuras.89 y 90, muestran son los resultados obtenidos con el software MoteView 2.0, del rendimiento en los dos escenarios.

node	node_pkts	forwarded	dropped	retries	battery	quality_tx	quality_rx	path_cost
3	91,67 %	0 %	8,33 %	79,71 %	2,5 v	93,33 %	100 %	12
7	10,59 %	88,56 %	0,85 %	15,69 %	2,7 v	86,67 %	100 %	13
9	10,7 %	84,66 %	4,64 %	40,13 %	2,9 v	100 %	100 %	12
10	18,08 %	80,3 %	1,61 %	23,68 %	2,7 v	100 %	86,67 %	13
19	1,86 %	97,99 %	0,15 %	40,63 %	2,6 v	100 %	100 %	4
26	16,64 %	82,96 %	0,4 %	12,6 %	2,6 v	100 %	100 %	4
33	14,01 %	85,79 %	0,2 %	31,75 %	2,9 v	100 %	100 %	4
65	21,43 %	70,39 %	8,18 %	81,37 %	2,8 v	93,33 %	100 %	8
442	80,07 %	19,93 %	0 %	58,78 %	2,9 v	46,67 %	100 %	9
60320	1.45 %	98.4 %	0.15 %	38.12 %	2.7 v	100 %	100 %	8

Figura. 89. Rendimiento de la red de sensores en el puente peatonal.

node	node_pkts	forwarded	dropped	retries	battery	quality_tx	quality_rx	path_cost
3	91,67 %	0 %	8,33 %	79,71 %	2,5 v	93,33 %	100 %	12
7	10,59 %	88,56 %	0,85 %	15,69 %	2,7 v	86,67 %	100 %	13
9	10,7 %	84,66 %	4,64 %	40,13 %	2,9 v	100 %	100 %	12
10	18,08 %	80,3 %	1,61 %	23,68 %	2,7 v	100 %	86,67 %	13
19	1,86 %	97,99 %	0,15 %	40,63 %	2,6 v	100 %	100 %	4
26	16,64 %	82,96 %	0,4 %	12,6 %	2,6 v	100 %	100 %	4
33	14,01 %	85,79 %	0,2 %	31,75 %	2,9 v	100 %	100 %	4
65	21,43 %	70,39 %	8,18 %	81,37 %	2,8 v	93,33 %	100 %	8
442	80,07 %	19,93 %	0 %	58,78 %	2,9 v	46,67 %	100 %	9
60320	1.45 %	98.4 %	0.15 %	38.12 %	2.7 v	100 %	100 %	8

Figura. 90. Rendimiento de la red de sensores en el puente San Pedro.

Las Figuras, 89 y 90, tiene 9 columnas cada una hace referencia a:

- ✓ node: Numero del nodo.
- ✓ node_pkts: Porcentaje de paquetes total generados por el nodo desde el ultimo reinicio.
- ✓ forwarded: porcentaje de paquetes de los nodos que envía desde otros nodos.
- ✓ dropped: Porcentaje de paquetes perdidos del nodo.
- ✓ retries: Porcentaje total de transmisiones que el nodo genera.
- ✓ battery: Nivel de batería.
- ✓ quality_tx: La calidad del enlace de transmisión.
- ✓ quality_rx: La calidad del enlace de recepción.
- ✓ path_cost: Coste.

En cuanto a los resultados obtenidos en las pruebas, se puede concluir.

Que el escenario de despliegue de los dispositivos influye directamente en la pérdida de paquetes, esto es, si se logra tener buenas características de propagación, existirá una menor cantidad de paquetes perdidos, lo que lleva a una menor cantidad de paquetes retransmitidos, y así se tiene un uso más eficiente del espectro, las baterías y el procesamiento de las motas.

Por otro lado, los retardos obtenidos en los dos escenarios son similares, lo cual nos dice que las condiciones físicas en las que trabajas las motas no determinan que retardos sean mayores.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6 Conclusiones

Se determinó que el diseño de la red de sensores inalámbricos para el sistema de monitoreo de puentes, es factible, ya que los cálculos y el análisis utilizando las herramientas de simulación, NS2 y radio Mobile, para el análisis de la disponibilidad, la capacidad y la calidad del enlace presentan valores adecuados, que aseguran un óptimo funcionamiento de la red, a esto se le puede añadir la viabilidad técnica y económica.

Las redes de sensores inalámbricos que su funcionamiento se basa en el estándar Zigbee, son la solución más efectiva para la implementación de sistemas de monitoreo de puentes que sea confiable y robusto, ya que presenta ventajas como, bajo consumo, un tamaño reducido de las motas, alta autonomía, escalabilidad de sensores, menor vulnerabilidad a fallos, bajo costo, facilidad de instalación, y adicionalmente gracias al protocolo de enrutamiento multi-salto la WSN cubre áreas extensas con tiempos bajos, permitiendo que exista una monitorización en tiempo real. Por lo que hace que estos dispositivos sean óptimos para el monitoreo de puentes.

La importancia de una conexión remota en este tipo de aplicaciones para el envío de datos a sitios distantes, para su posterior análisis, constituye una gran herramienta, para esto se debe garantizar la disponibilidad de la red de transporte en al menos un 85%, que se lo puede conseguir con el estándar 802.11 (WiFi-larga distancia).

El modelo de propagación TwoRayGround que se utilizó para la simulación de la red de sensores inalámbricos bajo el estándar Zigbee, trabaja de manera eficiente para un total de siete nodos, este modelo se ve afectado por reflexiones en la tierra al tener grandes distancias, lo cual no se aplica en el escenario de pruebas. Además con una potencia de 60mW, los resultados fueron óptimos, ya que se tiene una mayor actividad de los nodos, mayor alcance, alto porcentaje de paquetes recibidos, es decir un buen nivel de rendimiento.

Se realizó la comparación entre ambas pruebas y se concluyó que a pesar que los dispositivos estén trabajando de manera adecuada, existen problemas propios de los dispositivos que hacen que su rendimiento se deteriore en una monitorización en tiempo real, también se observó que el comportamiento en ambos escenarios es similar, sin embargo el factor de corrección es demasiado alto, especialmente en el retardo, lo que significa que las características intrínsecas de los dispositivos (procesamiento de información, baja respuesta del software), influyen en el retardo y hacen que los resultados de la simulación y la implementación sean diferentes.

Los resultados obtenidos son útiles para identificar y caracterizar el rol que juega cada uno de los componentes de hardware, y las aplicaciones involucradas; en las WSN. Se utilizó el Radio Mobile y el Ns2 como simuladores, para crear entornos visuales y de cálculo, logrando presentar los resultados y estadísticas de una forma más agradable y entendible para el usuario.

Se ha podido evaluar el comportamiento de una WSN en condiciones reales, habiendo demostrado ser lo suficientemente robusta y adecuada para poder alcanzar los objetivos planteados. A lo largo de todo el proyecto se han encontrado diversas situaciones y desafíos a los que se han establecido soluciones prácticas. La experiencia de este proyecto nos ha indicado que la administración

remota de las WSN es un punto importante en el desarrollo e implementación de estas redes. Esta línea de trabajo se debería profundizar en investigaciones futuras.

No existe un método definido para realizar el diseño de una red de sensores inalámbricos, es decir, hay que adaptarse a los requerimientos de la aplicación, y también de las características de los elementos que se van a emplear en el despliegue del sistema.

Finalmente se puede decir que gracias a este trabajo de investigación, se cuenta con un sistema que mide aceleraciones y monitorea la salud de un puente, además de tener un software que detalla toda la información, y un procesamiento de los datos recopilados. Con todo esto el prototipo creado ayuda a evaluar la salud de los puentes.

6.1 Recomendaciones

Existe una amplia información de las WSN, por lo que se recomienda, basarse en artículos reconocidos que los llevaran a estudios de gran interés, los cuales tienen un conocimiento robusto que nos ayudaran a afrontar una investigación con estos dispositivos.

Casi siempre los resultados obtenidos en las simulaciones tienen gran diferencia que los obtenidos en la implementación, por lo que se recomienda utilizar una herramienta como el Matlab, que permite realizar las comparaciones de una manera más clara. Además nos ayuda al desarrollo de modelos matemáticos los cuales nos predicen el comportamiento de los equipos en entornos reales.

En cuanto a la implementación y recolección de datos, se recomienda modificar el firmware de las motas, para aumentar la velocidad de muestreo,

teniendo una mejor resolución en cuanto al contenido espectral y pueda disminuir el principio de incertidumbre

Para alargar el tiempo de vida de los dispositivos y mejorar las condiciones energéticas de los nodos, al momento de realizar el despliegue, se recomienda realizar la implementación utilizando celdas solares.

6.2 Trabajos a Futuro

En base a los equipos CrossBow utilizados, se determinó que al trabajar con un software propietario limita al usuario a crear aplicaciones personalizadas, por lo que el software es demasiado general y envía información que no es necesaria en la monitorización de puentes. Para posteriores estudios se recomienda la utilización de equipos que trabajen con código abierto, las cuales permiten el desarrollo de aplicaciones según las necesidades del proyecto.

Al realizar el despliegue de la red de sensores se comprobó que si se desea trabajar en tiempo real el consumo de baterías es excesivo, esto hace que se deba realizar un estudio sobre implementación de sensores con energías alternativas que aumenten la autonomía de los dispositivos.

Desarrollar un protocolo que contemple la comunicación del estado de las baterías, y de esta forma usar los sensores que tengan mayor energía que los que poseen menos, y eliminar de la WSN los sensores que tengan su batería agotada, y así lograr un sistema de red más robusta.

Como trabajos futuros sobre el tema, deberían ser considerados: La implementación de seguridad en las WSN, IPv6 en WSN, Simulación de consumo energético.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anna, S. (15 de abril de 2010). Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón. Recuperado el 2012 de octubre de 26, de A Sidorova - 2010 - upcommons.upc.edu:
<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/12327>

Arano, C. G. (2009). IMPACTO DE LA SEGURIDAD EN REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES IEEE 802.15.4. Recuperado el 20 de 12 de 2012, de http://eprints.ucm.es/11312/1/Memoria_Fin_de_Master_-_Carlos_Garc%C3%ADa_Arano.pdf

ARM-EDGE, R. (2008). Assembly and Instruction Manual.

BitLibrary. (2008). BitLibrary. Recuperado el 14 de Abril de 2013, de <http://www.bitlib.net/show.php?id=24505822>

CARDENAS, D. N. (2011). Diseño de la Red de Telecomunicaciones de la ESPE para el Sistema de Supervisión y Alerta Temprana Frente a una Eventual Erupción del Volcán Cotopaxi. Recuperado el 13 de JULIO de 2013, de Diseño de la Red de Telecomunicaciones de la ESPE para el Sistema de Supervisión y Alerta Temprana Frente a una Eventual Erupción del Volcán Cotopaxi.:
http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CC4QFjAB&url=http%3A%2F%2Frepositorio.espe.edu.ec%2Fbitstream%2F21000%2F2792%2F1%2FT-ESPE-030339.pdf&ei=QOhmU56LDeHmsATk1IGYDQ&usg=AFQjCNF_HRQebBiGxyXKrmCKT3IgRjKfuQ&bvm=bv.65788261,d

EDWIN PATRICIO AMAGUAÑA DÁVILA, TATIANA MAGALI APOLO CÁRDENAS . (MARZO de 2009). DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX (IEEE 802.16-2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE. Recuperado el 11 de 2012, de <http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CC4QFjAB&url=http%3A%2F%2Frepositorio.espe.edu.ec%2Fbitstream%2F21000%2F389%2F1%2FT-ESPE-020959.pdf&ei=INpmU4TTCMuosQTEI4CQDg&usg=AFQjCNHeqtS8EwE0XjL82Pa4xJO3ms3o9Q&bvm=>

es.wikipedia.org. (s.f.). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo>

Espinosa, I. P. (2008). DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADOS A LA DETECCIÓN DE PESTICIDAS

EN AGUAS DE ZONAS BANANERAS . Recuperado el 19 de 12 de 2013, de
http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/5615/1/PFM_PatricioVizcaino.pdf

Farinaz Koushanfar, Miodrag Potkonjak, Alberto Sangiovanni- Vicentelli. (2008).
 Fault tolerance in wireless sensor network. Recuperado el 23 de
 Noviembre de 2012, de
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.87.1422&rep=rep1&type=pdf>

Fernández, J. N. (10 de septiembre de 2010). Simulación de Redes de Sensores
 Wireless. Recuperado el 17 de noviembre de 2012, de Simulación de
 Redes de Sensores Wireless:
http://www.recercat.net/bitstream/handle/2072/116653/PFC_JavierNavarroFernandez.pdf?sequence=1

Fernández, R. (2007). Sistema de adquisición de posicionamiento geográfico.
 Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña.

FindTheBest. (24 de Octubre de 2013). FindTheBest.com. Obtenido de
http://development-software.findthebest.com/saved_compare/Xcode-vs-NetBeans-vs-Eclipse

Fort, E. H. (2010). Red de sensores inalámbricos para monitorización estructural
 de edificios. Recuperado el 31 de octubre de 2012, de
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11941/fichero/PFC+Alfredo+Barroso+Arribas.pdf>

Grupo de Radiocomunicación, Departamento SSR. (2007). MANUAL DE
 RADIO MOBILE. Recuperado el 4 de JUNIO de 2013, de
http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0CEIQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.gatv.ssr.upm.es%2Fstelradio%2FRDCM%2Fadjuntos%2Fmaterial_consulta%2FManuales%2520del%2520programa%2520Radio%2520Mobile%2FManual_de_Radio_Mo

Heredia, J. J. (23 de Septiembre de 2008). Desarrollo y Estudio de Capacidades de
 Redes 802.15.4 Usando Dispositivos Micaz. Recuperado el 13 de Agosto
 de 2013, de Desarrollo y Estudio de Capacidades de Redes 802.15.4
 Usando Dispositivos Micaz:
<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/745/1/pfc2877.pdf>

HEREDIA, J. J. (23 de OCYUBRE de 2008). Desarrollo y Estudio de
 Capacidades de Redes 802.15.4 Usando Dispositivos Micaz. Recuperado

el 18 de AGOSTO de 2013, de
<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/745/1/pfc2877.pdf>

Hernandez, E. J. (2007). ESTUDIO DE LAS REDES SENSORIALES COMO UNA NUEVA ALTERNATIVA DE COMUNICACION INALAMBRICA. Recuperado el 15 de 12 de 2012, de
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/2372/1/T-ESPE-025074.pdf>

Hernandez, J. V. (01 de Abril de 2010). Redes Inambricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquia dinamica de grupos. Recuperado el 16 de Noviembre de 2012, de
<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8417/tesisUPV3326.pdf?sequence=11>

Hoblos, G, Staroswiecki, My Aitouche, A. (Septiembre de 2000). Optimal design of fault tolerant sensor networks. IEEE International Conference on Control Applications, 467-472.

Inregrantes deñ grupo de investigacion EDMANS. (2009). Redes Inalámbricas de Sensores: Teoría y Aplicación Práctica. . Recuperado el 03 de Diciembre de 2012, de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/377564.pdf>

Instituto Mexicano de Transporte. (1999). Evaluación de Puentes mediante el análisis de vibraciones. Recuperado el 05 de noviembre de 2012, de Evaluación de Puentes mediante el análisis de vibraciones:
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt132.pdf>

José, L. C. (Abril de 2009). Diseño de una red de sensores inalambricos para el monitoreo remoto de variables fisicas en areas agricolas para el desarrollo agrotecnologico del pais. Recuperado el 26 de Noviembre de 2012, de
<http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/1866/1/TESIS.IE009L50.pdf>

Juan Suardíaz Muro, Juan A. López Riquelme, Universidad Pontifica de Cartagena, Juan Jose García Heredia. (ENERO de 2012). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE VIDEOPORTERO BASADO EN REDES INALÁMBRICAS DE sensores. Recuperado el 22 de AGOSTO de 2013, de DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE VIDEOPORTERO BASADO EN REDES INALÁMBRICAS DE sensores:
<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2033/1/pfc4146.pdf>

Jürgens, B. (2008). agenciaidea.es. Obtenido de
http://www.agenciaidea.es/c/document_library/get_file?uuid=9e84835b-e749-4b6c-a01d-f60d3399fae9&groupId=10157

- Kazem Sohraby, Daniel Minoli. (2007). *Wireless Sensor Networks Technology, Protocols, and Applications*. ISBN 978-0-471-74300-2.
- kioskea. (s.f.). kioskea.net. Obtenido de <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3>
- M.Senthamilselvi and Dr.N.Devarajan. (05 de Septiembre de 2008). An Energy Efficient Distributed Algorithm for Connected Sensor Cover in Sensor Networks. Recuperado el 14 de Noviembre de 2014, de http://paper.ijcsns.org/07_book/200809/20080938.pdf
- Magni, J. Á. (2009). MEMS ACELERÓMETROS. Universidad de Cantabria.
- Marquez, D. I. (15 de NOVIEMBRE de 2007). Experiencias en la aplicación de las Wireless Sensor Network. Recuperado el 13 de AGOSTO de 2013, de http://paginaspersonales.deusto.es/ivazquez/ponencias/ivazquez_AplicacionesWSN_20071115.pdf
- Martell, C. V. (28 de Septiembre de 2011). Redes de sensores inalámbricos para el análisis de vibraciones. Recuperado el 30 de Noviembre de 2012, de <http://cursos.die.udec.cl/~jpezoa/memorias/20110930-cvergara>
- MARTÍN, O. (17 de abril de 2009). Control de la integridad de los puentes | Fieras de la Ingeniería. Recuperado el 12 de octubre de 2012, de Control de la integridad de los puentes | Fieras de la Ingeniería: <http://www.fierasdeingenieria.com/control-de-la-integridad-de-los-puentes/>
- MARTINEZ. (2009). Cuaderno de Anotaciones, Propagación y Radio enlace. Cuaderno de Anotaciones, Propagación y Radio enlace.
- Monitoreo de Salud Estructural, Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural. (2010). Monitoreo de salud estructural - Ingenieria.peru-v.com. Recuperado el 8 de Octubre de 2012, de Monitoreo de salud estructural - Ingenieria.peru-v.com: http://www.ingenieria.peru-v.com/documentos/Monitoreo_de_salud_estructural.pdf
- Omer Aziz, Benny Lo,Rachel King,Ara Darzi, Guang-Zhong Yang. (2010). Pervasive Body Sensor Network. Recuperado el 18 de noviembre de 2012, de Pervasive Body Sensor Network: <http://ubimon.doc.ic.ac.uk/bsn>
- Ortega, D. M. (Enero de 2012). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE VIDEOPORTERO BASADO EN REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES. Recuperado el 22 de Agosto de 2013, de DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE VIDEOPORTERO BASADO EN REDES INALÁMBRICAS DE

SENSORES:

<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2033/1/pfc4146.pdf>

Rabbit. (s.f.). MiniCore RCM5600W OEM User Manual.

Sherif El-Tawil, Ph.D., P.E., F.ASCE, University of Michigan. (1990). ASCE Journal of Structural Engineering. Recuperado el 09 de noviembre de 2012, de ASCE Journal of Structural Engineering:
<http://ascelibrary.org/journal/jsendh>

Sony. (22 de Octubre de 2013). Obtenido de http://www-support-downloads.sonymobile.com/st23/userguide_ES_ST23i_1267-5240.2_Android4.0.pdf

Sosa, E. O. (17 de junio de 2011). CONTRIBUCIONES AL ESTABLECIMIENTO DE UNA RED GLOBAL DE SENSORES INALAMBRICOS INTERCONECTADOS. Recuperado el 23 de noviembre de 2012, de CONTRIBUCIONES AL ESTABLECIMIENTO DE UNA RED GLOBAL DE SENSORES INALAMBRICOS INTERCONECTADOS:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.87.1422&rep=rep1&type=pdf>.

TRACEGRAPH. (s.f.). Obtenido de <http://getch.wordpress.com/2011/04/20/installing-tracegraph2-02->

UC Berkeley LBL, USC/ISI, and Xerox PARC. (2010). The VINT Project; The ns Manual. Recuperado el 11 de 2012

wd. (s.f.)zonestcurity. (03 de Abril de 2011). zonestcurity2011.blogspot.com. Obtenido de <http://zonestcurity2011.blogspot.com/2011/04/diferencias-entre-los-puertos.html>

FECHA DE ENTREGA

El proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Escuela Politécnica del Ejército desde:

Sangolquí, _____ del 2014

ELABORADO POR:

Héctor Stalin Martínez Chicango

172021625-6

AUTORIDAD

Ing. Carlos Paúl Bernal

Coordinador de la Carrera de Ingeniería en Electrónica
y Telecomunicaciones