



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES.

“Monitoreo en tiempo real de la salud estructural de puentes (MSE) para la detección temprana de fallas mediante un prototipo de red de sensores inalámbricos ubicados en el puente del Río Boquerón-Catamayo.”

TESIS DE GRADO PREVIO A OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES

Autora:

Valeria Estefania Quinde Granda

Director:

Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg Sc.

*Loja - Ecuador
2016*

CERTIFICACIÓN

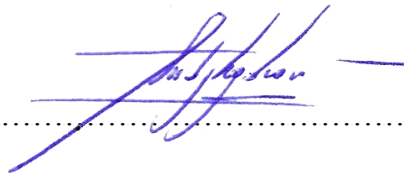
Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en “**Monitoreo en tiempo real de la salud estructural de puentes (MSE) para la detección temprana de fallas mediante un prototipo de red de sensores inalámbricos ubicados en el puente del Río Boquerón-Catamayo**”, previa a la obtención del título de Ingeniero (a) en **Electrónica y Telecomunicaciones**, realizado por la señorita egresada: **Valeria Estefania Quinde Granda**, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 13 de diciembre de 2016




Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TESIS

AUTORÍA

Yo, **VALERIA ESTEFANIA QUINDE GRANDA**, declaro ser autora del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi trabajo de tesis en el Repositorio Institucional- Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula: 1105932097

Fecha: 13 de diciembre del 2016

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA AUTORA, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo, **VALERIA ESTEFANIA QUINDE GRANDA** declaro ser autora de la tesis titulada: **“MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES (MSE) PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS MEDIANTE UN PROTOTIPO DE RED DE SENSORES INALÁMBRICOS UBICADOS EN EL PUENTE DEL RÍO BOQUERÓN-CATAMAYO”**, como requisito para optar al grado de: **ING. EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, trece días del mes de diciembre del dos mil dieciséis

Firma:



Autor: Valeria Estefania Quinde Granda.

Cédula: 1105932097

Dirección: Catamayo (San José)

Correo Electrónico: valeestefa15@gmail.com

Teléfono: 2558-049 **Celular:** 0982792862

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de tesis: Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.

Tribunal de grado: Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg. Sc.

Ing. John Jossimar Tucker Yépez, Mg. Sc.

Ing. Diego Fernando Carrera Moreno, Mg. Sc.

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a Dios la luz que me ha permitido caminar un sendero incierto, aquel que me ha tomado en su mano como su bolígrafo para escribir el libro de mi vida, por darme la vida, la salud, la inteligencia y la entereza para salir adelante.

A mi madre por ser el ángel que Dios me dio para guiar mi camino, por estar siempre junto a mí en todos los momentos, por darme la mano para que no caiga o para levantarme, por ser madre y padre a la vez, a mi hermana por estar ahí en todo momento como mi segundo ángel y darme su ayuda desinteresada.

A mi familia entera por cada una de las muestras de amor y de apoyo que me han brindado para hacer de mí una buena persona, por brindarme palabras de aliento y poder llegar a cumplir conmigo este gran sueño.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento en primera instancia a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA por haberme permitido formar parte del Área de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables y principalmente de la prestigiosa carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, la cual a través de su honorable planta docente ha contribuido tanto con mi formación académica como personal.

Así mismo, agradezco profundamente al Ing. Andy Vega León director de la presente tesis quien en todo momento me ha sabido brindar su apoyo y conocimientos para lograr alcanzar con éxito la culminación del presente trabajo de titulación.

A mis compañeros de aula como de carrera quienes han hecho que mi paso por esta prestigiosa institución sea llevadero convirtiéndose en mi segunda familia, agradezco especialmente a Jenny Luzuriaga mi amiga incondicional quien en cierta forma ha aportado su granito de arena para la realización de este trabajo de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	II
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
1. TÍTULO	1
2. RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
3. INTRODUCCIÓN	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
4.1 CAPÍTULO 1: MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (MSE) Y ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN PUENTE.....	7
4.1.1 Monitoreo de salud estructural (MSE)	7
4.1.2 Elementos de un puente.....	8
4.1.3 Tipología de puentes	9
4.1.4 Características de la estructura a monitorear.....	10
4.2 CAPÍTULO 2: VARIABLES QUE AFECTA LA SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES	12
4.2.1 Variables internas	12
4.2.2 Variables externas	15
4.3 CAPÍTULO 3: REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS (WSN)	16
4.3.1 Definición de Red.....	16
4.3.2 Sensores.....	17
4.3.2.1 Sensores de fibra óptica.....	17
4.3.2.2 Sensores inalámbricos	21
4.3.2.3 Sensores de medición remota.....	23
4.3.3 Ventajas comparativas entre sensores	24
4.3.4 Red de sensores	25
4.3.5 Redes De Sensores Inalámbricos (WSN).....	25
4.3.5.1 Elementos de una WSN.....	26
4.3.5.2 Aplicaciones de una WSN.....	27
4.3.5.3 Estándares orientados a una WSN.....	27
4.4 CAPÍTULO 4: ESTÁNDAR ZIGBEE (IEEE 802.15.4)	29
4.4.1 Definición.....	29
4.4.2 Características	29

4.4.3	Ventajas y desventajas	30
4.4.4	Capas del protocolo Zigbee.....	31
4.4.5	Seguridad en Zigbee.....	32
4.4.5.1	Modelo básico de seguridad.....	32
4.4.5.2	Arquitectura de seguridad	33
4.4.6	Módulos Xbee - Zigbee.....	34
4.4.6.1	Características	34
4.4.6.2	Series	35
4.4.6.3	Tipos de antenas	36
4.4.6.4	Modos de operación	37
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	40
5.1	SIMULADOR DE RED.....	40
5.1.1	Simulador OPNET	41
5.1.1.1	Instalación	42
5.1.1.2	Simulación de redes en OPNET.....	43
5.2	PARÁMETROS A EVALUAR DURANTE UNA SIMULACIÓN DE RED	47
5.3	DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES A MONITOREAR Y UBICACIÓN DE SENSORES.....	48
5.4	DISEÑO Y ESTRUCTURACIÓN DEL PROTOTIPO.....	51
5.4.1	Hardware – detalles técnicos de implementación	51
5.4.1.1	Nodo Sensor	53
5.4.1.2	Nodo Coordinador.....	66
5.4.2	Software	68
5.4.2.1	Desarrollo de la interfaz de monitoreo	69
5.4.2.2	Descripción de la interfaz de monitoreo.....	71
5.5	CÁLCULOS.....	74
5.5.1	Perdidas en el enlace de comunicación (L_t).....	74
5.5.1.1	Cálculo de la pérdida en el espacio libre (L_{lpf})	74
5.5.1.2	Cálculo de la pérdida debido a la presencia de vegetación ($L_{ITU} - R$).....	74
5.5.2	Potencia de recepción (Pdr).....	75
6.	RESULTADOS.....	76
6.1	RESULTADO Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE RED	76
6.2	RESULTADO Y ANÁLISIS DE LA POTENCIA DE RECEPCIÓN	78
6.3	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	82

6.4	INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA.....	89
6.4.1	Estabilidad.....	90
6.4.2	Vibración.....	91
6.4.3	Humedad y Temperatura.....	92
7.	DISCUSIÓN	94
8.	CONCLUSIONES	98
9.	RECOMENDACIONES	100
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	102
11.	ANEXOS.....	106
	ANEXO I: ABREVIATURA.....	106
	ANEXO II: CONSTITUCIÓN DE LOS NODOS SENSORES	109
	ANEXO III: CONSTITUCIÓN DEL NODO COORDINADOR Y CONFORMACIÓN DE LA WSN.....	111
	ANEXO IV: ESTRUCTURA DE MONITOREO	112
	ANEXO V: COSTO DEL PROTOTIPO	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un puente.	8
Figura 2. Socavación en puentes.	13
Figura 3. Fallo de una parte de un puente ocasionado por fatiga.....	13
Figura 4. Corrosión general presente en puentes.	14
Figura 5. Ilustración del sistema SOFO	18
Figura 6. Esquemático del interferómetro de Michelson	19
Figura 7. Ilustración del funcionamiento de un sensor Fabry Perot.....	20
Figura 8. Ilustración del funcionamiento de un sensor FBG.....	21
Figura 9. Ilustración de la constitución básica de un sensor inalámbrico.	22
Figura 10. Ilustración de un sistema de medición remota a través de GPS.....	24
Figura 11. elementos que conforman una red de sensores inalámbricos.	27
Figura 12. Capas de operación del protocolo Zigbee e IEEE 802.15.4.....	31
Figura 13. Encriptación utilizada para seguridad de información en Zigbee.....	33
Figura 14. Tipos de antenas de módulos Xbee.....	36
Figura 15. Modos de operación de módulos Xbee.....	37
Figura 16. Jerarquías de diseño en OPNET	41
Figura 17. Pantalla principal de descarga del simulador OPNET.....	42
Figura 18. Pantalla de instalación del simulador OPNET.....	43
Figura 19. Pantalla de inicio del simulador OPNET.....	43
Figura 20. Pantalla de inicio de simulación de redes.	44
Figura 21. Pantalla de inicio de simulación de redes, selección de área de trabajo..	44
Figura 22. Pantalla de selección de protocolo a utilizar en la simulación.....	45
Figura 23. Pantalla de selección de componente de una red zigbee.....	45
Figura 24. a) Red de sensores modelada, b) tabla de atributos del nodo coordinador.	46
Figura 25. Visualización de topología de red configurada.....	47
Figura 26. Ángulo de estabilidad en 2 ejes medido sobre la estructura..	49
Figura 27. Ubicación los diferentes nodos sensores sobre la estructura.	50
Figura 28. Componentes de un nodo sensor.....	53
Figura 29. Sensor de estabilidad, acelerómetro adxl345.....	54
Figura 30. Sensor de humedad, Dht11	55
Figura 31. Sensor vibración, sw-420.....	56
Figura 32. Arduino Uno, unidad de procesamiento.	57
Figura 33. Procesamiento realizado en uno de los nodos sensores.	58
Figura 34. Diagrama de flujo del procesamiento realizado por la unidad de procesamiento.....	59

Figura 35. Shield Xbee pro v1.1.	60
Figura 36. Xbee Pro S2B.....	61
Figura 37. Pantalla de configuración del nodo sensor.....	64
Figura 38. Esquema de conexión básica entre arduino y xbee.....	66
Figura 39. Conexión final del nodo sensor.....	66
Figura 40. Componentes de un nodo coordinador	66
Figura 41. Componentes de un nodo coordinador.	68
Figura 42. Esquema de conexión del nodo coordinador.	68
Figura 43. Herramienta de control de puerto serial en VS Express 2015..	69
Figura 44. Código para la apertura del puerto serial..	70
Figura 45. Código para la lectura de la información que recibe la unidad de recepción.....	70
Figura 46. Pantalla principal de la interfaz de monitoreo	72
Figura 47. Pantalla de registro de información de la interfaz de monitoreo..	73
Figura 48. Pantalla de inicio de sesión de la interfaz de monitoreo.	73
Figura 49. a) Topología en estrella, b) Topología en árbol.....	76
Figura 50. Curvas de valores obtenidas durante la simulación de las topologías en estrella y árbol.....	77
Figura 51. Pruebas de nivel de RSSI a diferentes distancias.....	80
Figura 52. Comparación de niveles de potencia de recepción a distancias de 150m, 100m y 50m respectivamente.....	81
Figura 53. Comparación de porcentaje de entrega de paquetes y niveles de confiabilidad a distancias de 150m, 100m y 50m respectivamente	81
Figura 54. nodo sensor final.....	82
Figura 55. a) Topología lógica y características del prototipo de WSN, b) Implementación del prototipo de WSN sobre la estructura..	83
Figura 56. Ubicación del sensor de vibración sobre la estructura.....	84
Figura 57. Selección del puerto de comunicación en la interfaz de monitoreo.....	85
Figura 58. Datos obtenidos durante el monitoreo en tiempo real de la estructura..	88
Figura 59. Ángulos de estabilidad obtenido por los 3 nodos sensores.....	91
Figura 60. Tiempos promedio de duración de vibración en la estructura.	92
Figura 61. Valores promedio de humedad y temperatura presente en el hormigón de la estructura.....	93
Figura 61. Constitución de los nodos sensores de estabilidad.	109
Figura 62. Constitución del nodo sensor de vibración.	109
Figura 63. Constitución del nodo sensor de humedad.....	110

Figura 65. Constitución del nodo coordinador.....	111
Figura 66. Conformación de la WSN con todos sus nodos.....	111
Figura 67. Estructura de monitoreo, vista lateral.	112
Figura 68. Estructura de monitoreo, vista frontal.....	112
Figura 69. a) Corrosión en el acero de los elementos primarios de la estructura, b) Relleno en socavación presente en el estribo izquierdo.	113
Figura 70. Ubicación de los nodos sensores 1, 3 y 4 sobre la estructura para su monitoreo. Vistos de izquierda a derecha.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etapas para la realización de monitoreo estructural.....	7
Tabla 2. Ventajas de sensores de fibra óptica, inalámbricos y de medición remota.....	25
Tabla 3. Comparación entre plataforma de simulación de red Zigbee.....	40
Tabla 4. Valores normales de las variables a monitorear en la estructura.....	49
Tabla 5. Característica del sensor de estabilidad, adxl345.....	54
Tabla 6. Característica del sensor de humedad, dht11.....	55
Tabla 7. Característica del sensor de vibración, sw420.....	56
Tabla 8. Características técnicas de la unidad de procesamiento.....	57
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la unidad de transmisión, Xbee Pro S2B.....	61
Tabla 10. Configuraciones del nodo sensor.....	63
Tabla 11. Característica de la unidad de potencia.....	65
Tabla 12. Configuraciones del nodo coordinador.....	67
Tabla 13. Resultados de la simulación de la WSN.....	78
Tabla 14. Horario de monitoreo.....	89
Tabla 15. Promedio de tráfico que circula sobre la estructura.....	89
Tabla 16. Costo total del prototipo.....	115

1. TÍTULO

**“MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE
PUENTES (MSE) PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS
MEDIANTE UN PROTOTIPO DE RED DE SENSORES INALÁMBRICOS
UBICADOS EN EL PUENTE DEL RÍO BOQUERÓN-CATAMAYO”**

2. RESUMEN

El presente proyecto despliega una revisión de literatura concisa, referente al monitoreo de salud estructural de un puente, tomando como literatura introductoria los elementos que constituyen un puente, tales como: superestructura, subestructura y acceso y principalmente se redacta de manera precisa las variables tanto internas como externas que afectan la salud estructural de la misma, las cuales permiten la correcta selección de los instrumentos de monitoreo.

La tecnología que permite el monitoreo de salud estructural juega un papel importante, puesto que la selección de la instrumentación necesaria dependerá del tipo de tecnología a ser aplicada, es por ello que se presenta una investigación acerca de los tipos de tecnologías que permiten el monitoreo de estructuras, en base a los requerimientos de monitoreo, considerando además los estándares que permiten una comunicación inalámbrica entre los instrumentos utilizados para la monitorización, así como las distancias y frecuencias en las que estos operan.

De la misma forma, se presenta una simulación de la red mediante el software de simulación OPNET con el fin de conocer el alcance que tendría un nodo respecto del otro, la forma en que cada uno de estos nodos se encuentran constituidos y principalmente la topología que presenta mayores ventajas en cuanto a retardo, throughput y recepción de datos. Se destaca, además, la forma en que se encuentran constituidos cada nodo que conforma la red en la cual el módulo Xbee pro S2B permite el establecimiento y comunicaciones de la misma, el cálculo del nivel de potencia de recepción del nodo coordinador a 100 metros de alcance y la forma en que fue desarrollada la aplicación que hace posible la obtención de información en tiempo real acerca de las condiciones de la estructura en el software VS express 2015.

Finalmente se presenta detalladamente las curvas obtenidas en la estación coordinadora referentes a la estabilidad en tres puntos específicos de la estructura, los cuales son: estribo izquierdo aguas abajo, estribo derecho aguas abajo y parte central, así como el tiempo de vibración, humedad y temperatura presente en la misma, así como la interpretación de dichas curvas.

ABSTRACT

The present project presents a concise literature review regarding the structural health monitoring of a bridge, taking as an introductory literature the elements that constitute a bridge, such as: superstructure, substructure and access, and mainly variables internal as external ones that affect the structural health of the same, which allow the correct selection of the monitoring instruments.

The technology that allows the monitoring of structural health plays an important role, since the selection of the necessary instrumentation will depend on the type of technology to be applied, that is why it is presented an investigation about the types of technologies that allow the monitoring of structures, based on the monitoring requirements, considering also the standards that allow wireless communication between the instruments used for monitoring, as well as the distances and frequencies in which these operate.

In the same way, a simulation of the network is presented through the opnet simulation software in order to know the scope of a node with respect to the other, the way in which each of these nodes are constituted and mainly the topology that presents greater advantages in terms of delay, throughput and reception of data. It is also highlighted the way in which each node forming the network is constituted in which the module xbee pro s2b allows the establishment and communications of the same, the calculation of the power level of reception of the coordinating node to 100 meters of scope and the way in which the application was developed that makes it possible to obtain information in real time about the conditions of the structure in vs express 2015 software.

Finally, we present in detail the curves obtained in the coordinating station regarding the stability in three specific points of the structure, which are: left stirrup downstream, right stirrup downstream and central part, vibration time, humidity and temperature present in the same, as well as the interpretation of these curves.

3. INTRODUCCIÓN

Dentro de un país, un sistema de carreteras es uno de los factores importantes a considerar como parte de su infraestructura, en dicho sistema los puentes son un elemento clave puesto que juegan un rol fundamental para el desarrollo del país. La falta de medición constante de variables estructurales de puentes ha ocasionado que este desarrollo se vea afectado, pues tendrá un alto impacto en todos los sectores y actividades de la sociedad.

La inspección y evaluación de dichas infraestructuras existentes en nuestro país ha comenzado de forma paulatina. Hasta hoy en día, todos los responsables de realizar la evaluación estructural de puentes lo realizan con base en evaluaciones visuales, siguiendo los lineamientos incluidos en manuales de inspección de puentes.

En Ecuador, se encuentran incursionando búsqueda de soluciones que permitan garantizar la estabilidad y salud estructural de puentes, así como la reducción de riesgos propiciados al proporcionar mantenimiento a ellos; esto debido a que hoy en día no se dispone de una herramienta para conocer de antemano cual es la situación actual en la que se encuentra inmersa la estructura de un puente, y mucho menos cuales serían los eventos que se podrían desencadenar por la falta de conocimiento de su estado.

Existen técnicas de evaluación que podrían ser aplicadas para estimar de manera cuantitativa la condición de los puentes, lo que permitiría dar una mejor perspectiva al tipo de evaluación tradicional, la cual está degradándose día a día.

La estabilidad de la infraestructura vial en la provincia de Loja, al igual que en el resto del país, es afectada principalmente por la circulación vehicular, por lo que la evaluación de forma oportuna, acertada y exhaustiva del estado estructural, puede ayudar a predecir su comportamiento ante diferentes eventos o solicitudes y la implementación a tiempo de acciones correctivas de reparación o reforzamiento de la misma es decisiva para la ciudad.

El cierre total o parcial de puentes debido a deterioros es una realidad que se ha experimentado ya en varias ocasiones y que ha repercutido en el cierre de carreteras y en la saturación de rutas alternas, todo ello debido a la falta de un sistema de administración de puentes que involucre un programa de monitoreo constante de todas estas estructuras. Además de las repercusiones que tendría este en cuanto a la saturación de rutas alternas, un problema de mayor índole es el que se puede dar en el momento en que se encuentra

prestándole un mantenimiento correctivo a la estructura, pues debido a que la misma se encuentra con problemas severos se pueden desencadenar sucesos como accidentes del personal que se encuentra realizando esta labor, o en dado caso que se produzcan accidentes de los transeúntes que desconocen de las condiciones de la estructura.

El monitoreo de salud estructural (MSE) se ha constituido en el tipo de técnica de evaluación cuantitativo que apoye la toma correcta de decisiones referente a la salud de la estructura, consistiendo en la implementación de un sistema para identificar los daños, el cual abarca monitoreo, procesamiento de datos y la correspondiente interpretación para evaluar las condiciones de la estructura con el fin de detectar daños que se pueden presentar en el interior de la misma y tomar decisiones apropiadas, para prevenir la caída o colapso de la misma, evitando pérdidas económicas, así como humanas.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN por sus siglas en inglés, Wireless Sensor Network) han permitido que el MSE sea aplicado en diferentes lugares del mundo, obteniendo de ellas resultados positivos en cuanto a la obtención de información, ya que han permitido la prevención y detección temprana de riesgos. El desarrollo de estructuras más esbeltas, pero más inteligentes es una necesidad que se está evidenciado especialmente en el país puesto que al presentarse situaciones catastróficas éstas responderían de forma eficiente reduciendo de esta manera los riesgos que estas situaciones acarrear.

Es por todo lo antes mencionado que el presente trabajo de titulación supone que las WSN contribuyen a dar solución al problema que se evidencia, debido a que una herramienta como esta aportaría a la mejora en la toma de decisiones para un mantenimiento oportuno y reducción de riesgos.

En la ciudad de Loja no existen estructuras inteligentes, ni mucho menos empresas que con este tipo de tecnología que contribuyan a la prevención y reducción de riesgos, por lo que la finalidad de este proyecto es diseñar un sistema para monitoreo en tiempo real de puentes mediante un prototipo de sensores inalámbricos que permitan conocer la salud estructural de puentes en tiempo real, detectar los daños, cuantificar el estado del deterioro y reducir riesgos. Contribuyendo de esta manera con una herramienta que sirva como base para permitir el desarrollo tecnológico de la ciudad en este ámbito y contribuya con

la prevención de riesgos que se pueden presentar en casos fortuitos a través del monitoreo en tiempo real de la estructura.

Basándose en las condiciones antes mencionadas y en la importancia que recae sobre este tipo de estructuras se propuso el desarrollo de la presente tesis, exponiendo de manera precisa las condiciones que se pueden presentar sobre la estructura, los instrumentos de monitoreo y sensado que contribuyen en la adquisición fiable de la información y la interpretación misma en base a criterios de un especialista en materia de salud estructural.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 CAPÍTULO 1: MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (MSE) Y ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN PUENTE

4.1.1 Monitoreo de salud estructural (MSE)

Tecnología que combina la captura de datos con el análisis de dicha información. Los datos se consiguen desde una red sensorial no destructiva, con la cual se obtienen indicadores que permiten detectar daños o degradaciones en la estructura. Esta información puede ser periódica y está asociada a cambios diversos como: socavación, corrosión, fatiga, reacciones químicas, humedad, cambios en las variables del ambiente y otros cambios que sean necesarios para el MSE de un puente. El campo del monitoreo de salud estructural es amplio, desarrollándose y aplicándose con intensidad principalmente en las ingenierías aeronáutica, civil y mecánica. En la tabla 1. se pueden distinguir las etapas del monitoreo estructural, mismas que variarán dependiendo de la estructura en estudio (1) (2).

Estrategia de monitoreo	<ul style="list-style-type: none">•Objetivos del monitoreo•Selección de los parámetros a monitorear•Selección del sistema de monitoreo•Ubicación de sensores•Calendario de actividades•Costos
Instalación del sistema de monitoreo	<ul style="list-style-type: none">•Intalación de sensores•Instalación de accesorios•Instalación de programas•Instalación de interfaces
Mantenimiento del sistema de monitoreo	<ul style="list-style-type: none">•Abastecimiento de energía eléctrica•Mantenimiento de líneas de comunicación•Planes de mantenimiento•Reparaciones
Manejo de la información	<ul style="list-style-type: none">•Ejecución de mediciones•Almacenamiento de la información•Acceso a la información•Visualización•Exportación de información•Interpretación•Análisis•Uso de la información
Actividades finales	<ul style="list-style-type: none">•Finalización del monitoreo•Retiro del sistema de monitoreo•Almacenamiento del sistema de monitoreo

Tabla 1. Etapas para la realización de monitoreo estructural (3).

4.1.2 Elementos de un puente

Existen 3 partes que forman un puente y a la vez que se diferencian por la función que cada uno realiza, como se muestran en la figura 1 (4) (5).

- A. Superestructura
- B. Subestructura
- C. Accesos y defensas

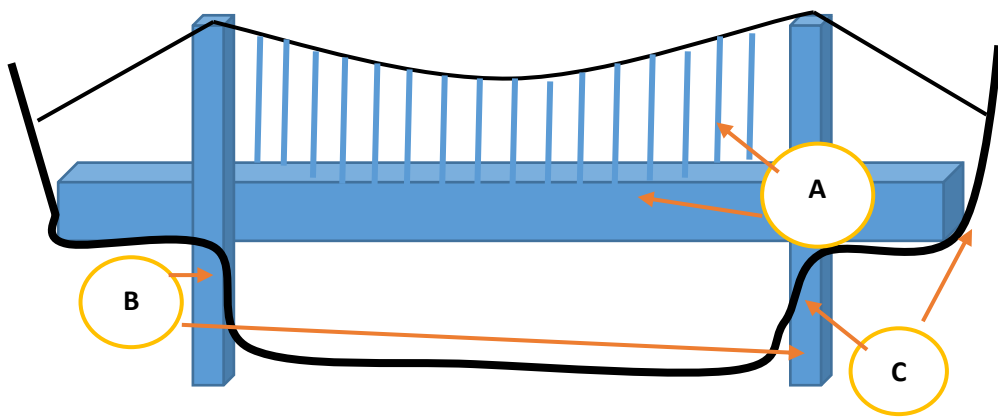


Figura 1. Elementos de un puente.

Fuente: Elaboración propia.

A. Superestructura: Comprende todos los componentes que permiten el tráfico. Está compuesta por:

- ✍ **Cubierta:** Extensión física de la calzada.
- ✍ **Superficie de rodado:** Generalmente soporta el peso del tráfico que circula sobre él.
- ✍ **Elementos primarios:** Distribuyen carga longitudinalmente, y son diseñados para oponerse a la flexión.
- ✍ **Elementos secundarios:** Diseñados para oponerse a la deformación cuadrículada del marco de superestructura.
- ✍ **Apoyos.**

B. Subestructura: Soporta la superestructura y el tráfico transfiriendo las cargas desde el puente al suelo.

✍ **Estribos:** Sostienen los terraplenes que conducen al puente, es decir trabajan como muros de contención.

C. Accesos y defensas: Incluyen todos los elementos complementarios que no aportan capacidad resistente (6). Los principales elementos son:

✍ **Protección de laderas**

✍ **Subdrenaje**

✍ **Accesos**

✍ **Barreras**

4.1.3 Tipología de puentes

Los puentes se pueden clasificar según la naturaleza de la vía soportada, puentes de:

✍ Carretera

✍ Ferrocarril

✍ Canal

✍ Acueductos

Según el material constitutivo, puentes:

✍ Metálicos

✍ Madera

✍ Hormigón

Y finalmente puentes mixtos, que son estructuras que combinan materiales para su diseño y operación, tal como el acero y el hormigón que trabajan conjuntamente. Actualmente los puentes mixtos formados por los materiales antes mencionados son los más utilizados

pues su ligereza en construcción es una ventaja sobre los puentes metálicos que se torna evidente (6).

4.1.4 Características de la estructura a monitorear

La estructura vial a monitorear es el puente ubicado sobre el río boquerón en Catamayo-Loja con coordenadas 4°03'29.14" S y 79°22'29.34" O, el cual fue construido en 1961 combinando las características de materiales como el hormigón y acero, los cuales son ampliamente utilizados para este tipo de estructuras y que, en base a la utilización de estos materiales, los ingenieros Eduardo Naranjo y Walter Seligman delegados del MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS (MTO) le proyectaron un tiempo de vida útil de 100 años.

Este puente cuenta con las siguientes características:

- Longitud total (Luz): 50 m.
- Ancho de calzada: 7.20 m.
- Altura del puente (sobre la corriente): 7.0 m.

Cabe destacar que en 1977 se le realizaron diferentes mantenimientos y revisiones en las cuales lo que se realizó el relleno tras estribos y encausamiento de corriente (protección), sin embargo, esta revisión habría sido la única, al menos la única registrada.

En marzo de 2015 a los 51 años de vida útil, debido a una nueva inspección realizada y por peticiones de moradores, se da un nuevo mantenimiento en el cual lo que se realiza el agregado de material pétreo bajo las bases del puente (estribos) pues en este se había evidenciado la presencia de socavación y se trató con ello de mitigar el daño que se estaba presenciando, no obstante, las condiciones en las que este se encuentra no son buenas, pues, en base a inspecciones realizadas se deja ver la existencia de corrosión de acero en las partes laterales de la estructura, siendo esta una de las variables que afectan con el tiempo a su estabilidad, enfatizando además que la altura del puente se ha visto modificado durante los últimos años ya que el nivel del cauce del río ha comenzado a disminuir.

Es por ello que, en base a las características que presenta la estructura entre ellas su longitud, pues es la estructura de mayor luz a nivel de la provincia de Loja, en base a la socavación presentes en esta y considerando que constituye una de las principales estructuras de comunicación vial en los tramos Catamayo-Gonzanamá-Cariamanga-

Sozoranga-Macará, se decide la selección de la misma como objeto de monitoreo, pues con ello se podrá determinar su condición estructural. Finalmente, las características mencionadas se pueden apreciar en las imágenes localizadas en el anexo IV.

4.2 CAPÍTULO 2: VARIABLES QUE AFECTA LA SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES

Una infraestructura se ve afectada tanto internamente como externamente, y esto se puede evaluar en base a un monitoreo exhaustivo de la infraestructura y no solo visual. A continuación, se detallarán las variables que afectan principalmente la salud estructural de un puente mixto.

4.2.1 Variables internas

Estas variables con frecuencia son utilizadas para evaluar cada elemento de un puente y con ello determinar su estado (7) (8). Estas son:

✍ **Socavación:** Consiste en la remoción o pérdida de material a causa del flujo de agua alrededor de la estructura, como se muestra en la figura 2. Dichos materiales se socavan en diferentes formas, es decir: suelos granulares sueltos se erosionan rápidamente mientras que los suelos arcillosos son más resistentes a la erosión.

Existen diferentes tipos de socavación los cuales se presentan independientemente el uno del otro, estos son: a) socavación a largo plazo, b) socavación local y c) socavación general que sumandos forma en si la socavación total (8) (9).

a. Socavación a largo plazo: Degradaciones que se presentan a lo largo del tiempo a causas externas e impredecibles ya sean naturales o inducidas por el hombre.

b. Socavación local: Remoción del material debido a los cambios de dirección de las líneas de corriente, la turbulencia, aceleración de flujo y vórtices resultantes inducidos por la obstrucción al flujo.

c. Socavación general: Descenso generalizado del fondo del río.

Se evidencia en la estructura de la siguiente manera:

✍ Apoyos desnivelados

- ✎ Socavaciones visibles en pilas, estribos y/o aletas.
- ✎ Obstrucción del cauce

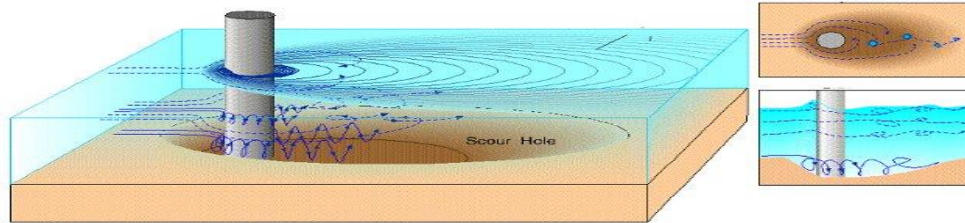


Figura 2. Socavación en puentes (10).

✎ **Fatiga.** - fenómeno que se suele presentar de forma súbita y que se produce debido a cargas repetitivas, evidenciándose con pequeñas hendiduras iniciales en los puntos con mayor concentración de tensión en los miembros del puente. Se exterioriza en regiones en las que se presenta mayor concentración de tensión y se propaga aumentando su tamaño en regiones circundantes como se muestra en la figura 3 (9).



Figura 3. Fallo de una parte de un puente ocasionado por fatiga (11).

✎ **Corrosión en el acero.** - Acción química o biológica que se puede evidenciar de forma lenta o acelerada sobre el elemento en contacto con el medio ambiente, degradando el material hasta tal punto que puede llegar a destruirlo. Consiste en la pérdida de equilibrio de las fuerzas cohesivas del material. Se pueden presentar 2 tipos: corrosión superficial cuando la superficie del material esta corroída uniformemente, es la forma menos agresiva de la corrosión debido a

que la distribución es uniforme y su proceso es lento como se presenta en la figura 4. Y corrosión localizada la cual se presenta de forma más agresiva y se evidencian corrosiones de mayor profundidad en el material.



Figura 4. Corrosión general presente en puentes (12).

✎ **Infiltración.** - Se exhibe en los puntos donde el agua no tiene buena circulación, y dicha acumulación de agua en busca de una salida hace que los materiales de los diferentes elementos sufran cambios químicos que los hace perder sus características iniciales.

Se presenta en aquellos puntos en donde la estructura tiene dilataciones por construcción y con el paso del tiempo esta infiltración deteriorara la estructura, a los elementos de concreto los mantiene húmedos hasta el punto en que se puede visualizar manchas en su superficie generando el nacimiento de materia orgánica en los puntos donde el agua está situada por un periodo de tiempo determinado.

✎ **Impacto.** – Golpes que pueden provocar daños leves como graves en el puente. Este ocasiona la propagación u originar grietas, pérdida de rigidez y colapso de la estructura.

✎ **Sobrecarga.** – Estas son: el flujo del cauce del río debajo de la estructura que puede manifestarse tanto en la base como en la superestructura en caso de inundaciones extraordinarias; sobrecargas generadas por el frenado de los vehículos, impactos de automóviles, barcos y objetos arrastrados a lo largo del

cauce, fuerzas centrífugas en puentes curvos, y viento (8) (9).

4.2.2 Variables externas

Estas variables afectan el puente y hacen referencia a las dimensiones, al uso de la estructura, al año de su construcción, la región donde se encuentra ubicado, las zonas de inundación registradas en el territorio, las zonas de vulnerabilidad sísmica, etc. Normalmente este tipo de variables son utilizadas para dar prioridad a un puente con respecto a otro. A continuación, se describen este tipo de variables:

- ✎ **Año De Construcción.** - Tiene peso de importancia ya que dependiendo del año de diseño hay proyecciones del tráfico que al transcurrir los años se ve modificado por las situaciones que se atraviesen y que no son iguales a los valores previstos durante la etapa de diseño. Las condiciones climáticas, las cargas y la frecuencia de tráfico no son las mismas estos varían y se tornan más preocupantes con el pasar de los años.
- ✎ **Luz, ancho y altura de pilas.** - Tienen peso dentro de la estructura y su condición final debido a que con el paso de los años se pueden volver obsoletas o pueden estar generando algún tipo de vulnerabilidad ante fenómenos naturales o cargas de tránsito elevadas (9). Estas variables son consideradas debido a que, dependiendo de sus dimensiones, la aplicación de acciones correctivas o de fortalecimiento de la estructura se verá directamente afectada. Cabe destacar que luz en ingeniería civil hace referencia al largo de la estructura de comunicación vial.
- ✎ **Zona de inundación.** - Fenómeno natural cuya amenaza tiene una mayor área de influencia, es más frecuente y puede tener consecuencias devastadoras, la información disponible a nivel mundial sobre este tipo de fenómenos evidencia que a medida que pasa el tiempo somos más vulnerables a estas presentaciones de la naturaleza (8).

4.3 CAPÍTULO 3: REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS (WSN)

4.3.1 Definición de Red

Una red es un conjunto de dispositivos electrónicos vinculados a través de un medio de transmisión con la finalidad de que estos puedan trabajar conjuntamente en equipo.

Existen diferentes tipos de redes dependiendo del área geográfica que cubren y la forma de conexión.

Según el área geográfica estas pueden ser:

- ✎ Redes de área personal (PAN por sus siglas en inglés *Personal Area Network*), este tipo de redes se caracteriza por permitir la comunicación dentro del rango de una persona, que generalmente corresponde a 1 m.
- ✎ Redes de área local (LAN por sus siglas en inglés *Local Area Network*), son redes de propiedad privada cuya operación se da únicamente dentro de un edificio, es decir dentro de un área geográfica moderada, siendo esta área de 10 metros que corresponde a un cuarto hasta 1 km que corresponde a un campus. Este tipo de redes es muy popular en la actualidad, puesto que permiten la ampliación de una red personal con el fin de compartir recursos e intercambiar información con otros.
- ✎ Redes de área metropolitana (MAN por sus siglas en inglés *Metropolitan Area Network*), caracterizada por cubrir toda una ciudad, siendo un claro ejemplo de ellas las redes de televisión por cable. Este tipo de redes son capaz de cubrir áreas que van de 10 km a 100 km.
- ✎ Redes de área extendida (WAN por sus siglas en inglés *Wide Area Network*), abarcan una extensa área geográfica, por lo general un país o continente, en donde dicha área va desde 100 km a 1000 km (13).

Según la conectividad pueden ser:

- ✎ Redes de difusión, las mismas que pueden ser *unicast* (de un transmisor a un receptor), *multicast* (de un transmisor a varios receptores) y finalmente *broadcast* (hacia todos los receptores).

- ✎ Redes punto a punto conocidas como unidifusión corresponde a redes que hacen uso de algoritmos de ruteo para la selección de camino o ruta correcta.

4.3.2 Sensores

Dispositivos que tienen la potestad de convertir una magnitud física como: Temperatura, Humedad, distancia, etc. en valores medible de dicha magnitud permitiendo obtener información veraz que muchas de las veces puede tornarse imperceptible.

Existen 3 tipos de sensores que permiten el MSE de un puente cuya diferencia radica en los materiales utilizados para su elaboración, estos son:

- A. Sensores de fibra óptica.
- B. Sensores inalámbricos.
- C. Sensores de medición remota.

4.3.2.1 Sensores de fibra óptica

La aplicación de la fibra óptica en el monitoreo de infraestructuras civiles consiste básicamente en la medición de temperatura, presión, deformaciones (galgas cortas) y desplazamientos relativos entre dos puntos de una estructura (galgas largas), sin embargo, también existen acelerómetros de fibra óptica.

Existen diferentes tipos de sensores, los cuales se describen a continuación:

- ✎ **Sensores de baja coherencia (*Low-coherence sensor*):** Consiste básicamente en extensómetros de galga larga la cual utiliza dos fibras ópticas unimodales (permiten una mayor distancia de transmisión) como una unidad: una es llamada fibra de referencia y se encuentra totalmente libre de esfuerzos; mientras la otra es llamada fibra de medición y se encuentra adherido a la estructura denominando a esta parte de la estructura como zona activa, esta se presenta en la figura 5 y es conocido como sistema Monitoreo de Estructuras por Fibra Óptica (SOFO por sus siglas en francés, *Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques*).

El desplazamiento relativo entre dos puntos de una estructura hará cambiar la longitud de la fibra de medición, en comparación con la fibra de referencia y basado en el concepto óptico de interferometría (superposición de la luz proveniente de diferentes receptores para la obtención de imágenes con gran resolución) de baja coherencia, se puede interpretar la deformación mediante el Doble Interferómetro de Michelson que basa su funcionamiento en el uso de una fuente láser que proyecta su luz sobre un espejo semitransparente dejando pasar únicamente el 50% de la luz y el otro 50% es reflejado sobre 2 espejos fijo y móvil, estos reflejan reiteradamente esta luz para que sea visualizada en la pantalla determinando de la interferencia existente cuando dichos espejos se encuentren separados a distancias diferentes del espejo semitransparente.

A continuación, en la figura 6 se muestra un esquemático del interferómetro de Michelson.

La aplicación del sistema SOFO en el monitoreo de puentes mide principalmente la curva de deflexión¹ del puente, esta última se infiere mediante la doble integración de la función de curvatura para cada celda de medición (14).

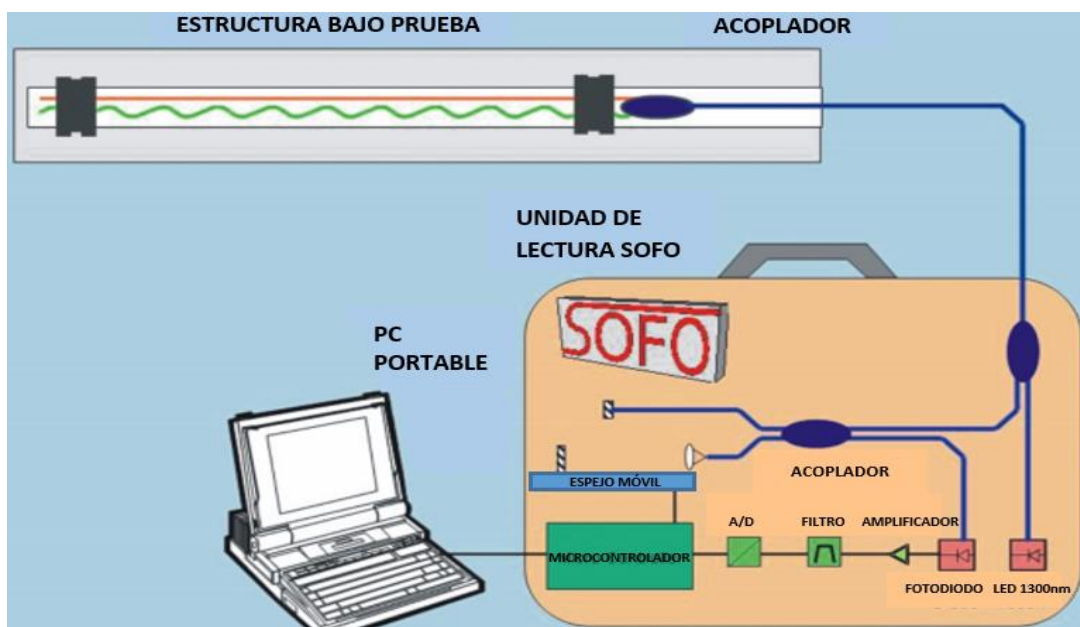


Figura 5. Ilustración del sistema SOFO (15).

¹ **Deflexión:** Se considera como la deformación que sufre una estructura a causa de flexiones internas.

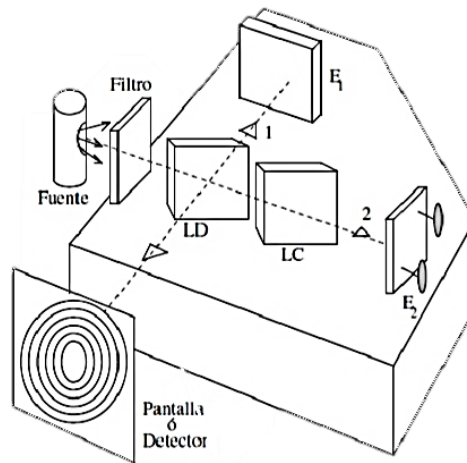


Figura 6. Esquemático del interferómetro de Michelson (16).

✎ **Sensor Interferométrico Extrínseco *Fabry-Perot*:** Se basa en el uso de 2 fibras tanto de entrada como de salida, dejando entre ellas un espacio vacío conformado por un tubo de silicio.

Se lo representa como un interferómetro de dos haces de luz como se muestra en la figura 7: parte de la luz láser que llega al terminal de la fibra de entrada/salida es reflejada en la interface fibra/aire (R1); la luz restante continúa su propagación a través del vacío (L) y el segundo reflejo ocurre en la interface aire/fibra (R2). R1 es la reflexión de referencia mientras que R2 es la reflexión propiamente del sensor (17). Estas dos ondas de luz podrían interferir constructiva o destructivamente basado en el desfase de los dos haces reflejados. De manera que, si el tubo de sílice es adherido a una superficie o si es embebido rígidamente dentro de una matriz, la deformación del medio hará cambiar de longitud a la parte vacía. Dado que la longitud del sensor es conocida, la deformación del medio puede entonces calcularse con exactitud basado en el cambio de interferencia obtenido (15).

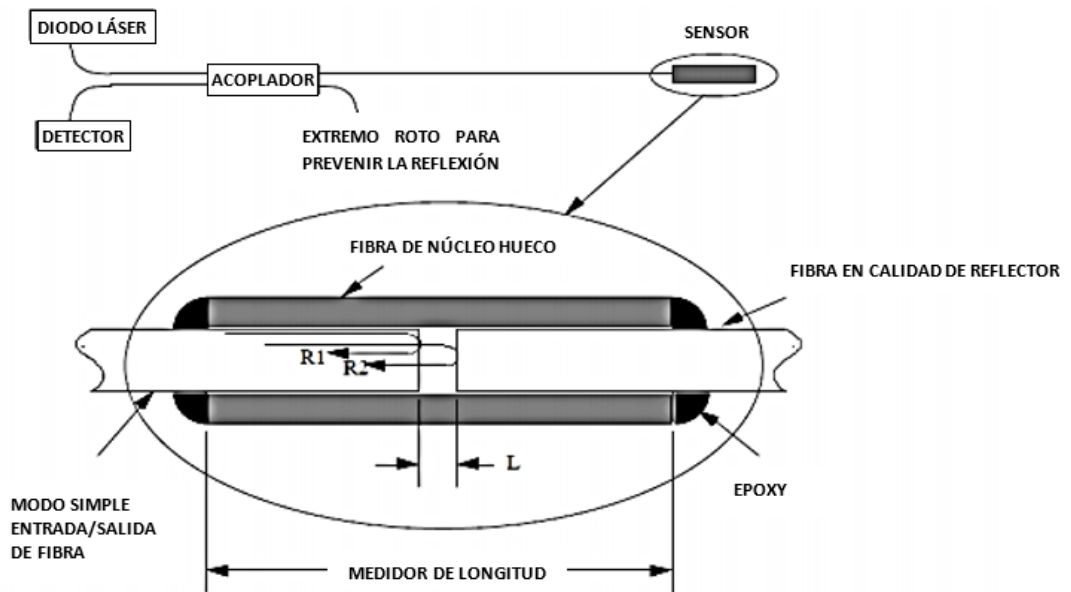


Figura 7. Ilustración del funcionamiento de un sensor Fabry Perot (17).

✎ **Fibra de Rejilla de Bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG):** Se basa en la modulación de longitud de onda de luz, actuando como un filtro selectivo de longitud que refleja únicamente aquella parte del espectro de luz que satisface las condiciones de la Rejilla de Bragg dada.

Cuando la rejilla se deforma axialmente, esto hace que la longitud de onda de la reflectividad máxima cambie y consecuentemente, habrá un desplazamiento en el espectro de luz reflejado en cuanto a su longitud de onda (18).

Debido a su capacidad para medir diferentes tipos de fenómenos físicos haciendo uso de una sola fibra óptica puede ser de gran ayuda en una amplia gama de aplicaciones. Esto hace que sea una tecnología ideal para la sustitución y/o mejora de sensores eléctricos convencionales. El funcionamiento de este tipo de sensor se representa en la figura 8.

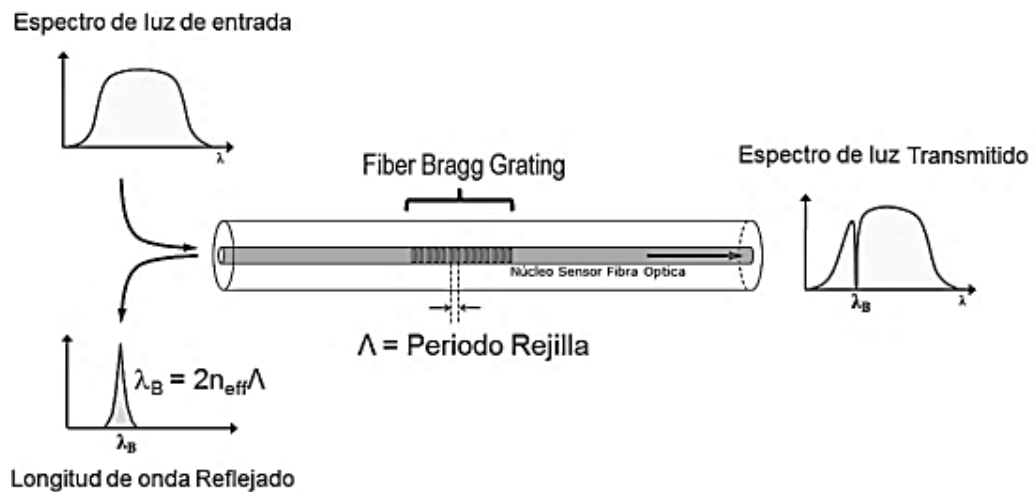


Figura 8. Ilustración del funcionamiento de un sensor FBG (1).

4.3.2.2 Sensores inalámbricos

Son una unidad de procesamiento que provee una plataforma de comunicación inalámbrica entre los nodos de los sensores, el nodo host o anfitrión y el usuario final a través de señales de radio (20).

Asimismo, la integración de un núcleo de procesamiento en el mismo sensor inalámbrico lo convierte en un instrumento inteligente que permite ejecutar algoritmos de forma paralela para el monitoreo, detección de daños, y el control en tiempo real en una estructura (15).

Un aspecto a tomar en cuenta en cierta forma como una desventaja es el suministro de energía, pues, a pesar de que existen baterías recargables que podrían suministrar energía durante unos 3 días de medición continua aproximadamente, las cuales podrían servir para diagnósticos tipo “fuera-de-línea” (*offline evaluation*), si se requiriera de una instalación intacta y que su monitoreo sea en tiempo real y 24/7, se demandaría de una fuente de energía continua y estable o en su defecto autosustentable. Este último tipo de fuente se puede lograr mediante la utilización de paneles solares o recolectores de energía vibratoria proveniente de la estructura misma que eliminaría la necesidad de dependencia de cable de alimentación.

Como se muestra en la figura 9 este tipo de sensores está constituido básicamente por:

- ✦ Un microcontrolador que coordina todas las funciones integradas en el sistema

y permite recibir y ejecutar comandos de forma remota.

- ✍ Una memoria RAM
- ✍ Un módulo de radio inalámbrico
- ✍ Un Convertidor Análogo-Digital con ganancia programable
- ✍ Unidad de suministro de energía.

En la actualidad existen empresas encargadas de comercializar sensores inalámbricos de código abierto como lo es la marca Mote² y de código privado iMote, NT-WSU, mismo cuyo valor económico llega hasta los \$ 1500 dólares por sensor (21). Existe una opción a este tipo de sensores, la cual es la realización de este por medio del ensamblado de instrumentación que brinde las características necesarias para realizar el monitoreo constituyéndose este en una reducción en cuanto a precios, obteniendo resultados muy similares, aunque aumentando el nivel de complejidad en cuanto a la realización de los nodos.

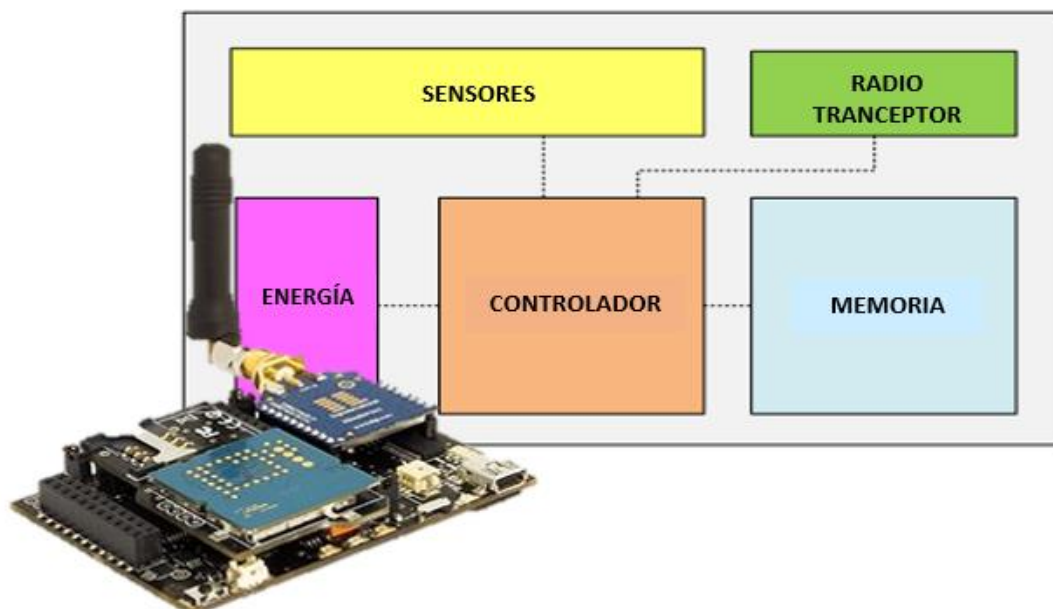


Figura 9. Ilustración de la constitución básica de un sensor inalámbrico (15).

² **Motes:** Marca de dispositivos electrónicos que provee dispositivos inalámbricos basados en tecnología MEMS (sistemas microelectromecánicos) y cuya característica principal es su tamaño y autonomía de operación.

4.3.2.3 Sensores de medición remota

Dispositivos que permiten medir los cambios de posición de puntos específicos de una estructura en tiempo real como: sistema de posicionamiento global GPS, radares, técnicas de interferometría de microondas, métodos óptico electrónicos como: ondas láser y el método de correlación de imágenes digitales, etc.

Debido a la complejidad de su constitución el valor económico de este tipo de sensores es elevado por lo que es común su uso en estructuras cuyo ancho, luz y altura sean de gran consideración.

Existe una gran cantidad de sensores que proporcionan una cobertura global a diferentes escalas espaciales y temporales como los mencionados anteriormente, los mismo que son sensibles a distintas regiones del espectro electromagnético.

✎ Sistema de posicionamiento global GPS

Este sistema ha sido empleado para el monitoreo continuo de desplazamientos y deflexión estática en puentes de gran envergadura como se ilustra en la figura 10.

Por otro lado, muchas veces el GPS constituye un elemento indispensable para los sistemas de monitoreo de fibra óptica, pues, el método de doble integración para obtener la curva de deflexión del puente requiere de condiciones de frontera para la sección de análisis, las cuales no se puede obtener con exactitud sin tener datos precisos de desplazamiento y rotación de las fronteras de la sección que, por lo general, son las pilas o las torres de los puentes (15).

Primordialmente este tipo de sistema como se ha mencionado anteriormente es de gran utilidad en estructuras que requieren de datos precisos e ininterrumpidos, sin importar las condiciones ambientales, por esta razón este es uno de los sistemas utilizados en el puente Tsing-Ma de Hong Kong que como es de conocimiento es uno de los puentes con mayor luz (22).

Este sistema puede variar en un rango entre milímetros y metros dependiendo de diversos factores como obstrucción de la señal, desalineación de los tx y rx,

destacando que la información de las coordenadas horizontales obtenidas es de dos a cinco veces más precisa que la que se obtiene en las coordenadas verticales.

✎ Sistema de Radar Interferométrico

Opera en el rango de microondas, es capaz de medir el desplazamiento de múltiples puntos de una estructura en forma simultánea con una precisión de centésimas de milímetros (15).

Para las mediciones de desplazamientos dinámicos, el sistema puede captar frecuencias de vibración de la estructura desde 0 Hz hasta 100 Hz, permitiendo, además, medir tanto deflexiones estáticas como vibraciones partiendo de que se puede identificar las frecuencias y las formas modales.

Este tipo de sistema tiene la misma aplicación que en la cartografía digital permitiendo las imágenes fotográficas y otro tipo de imágenes satelitales conservando su precisión a una de distancia de hasta 15 cm.

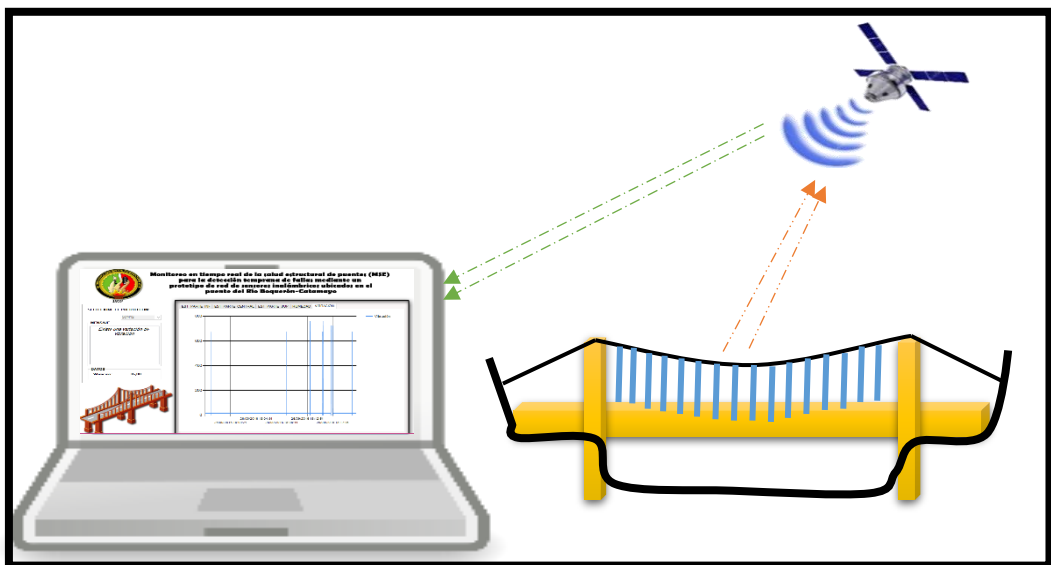


Figura 10. Ilustración de un sistema de medición remota a través de GPS.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Ventajas comparativas entre sensores

A continuación, en la tabla 2 se presentan las principales ventajas que cada uno de los tipos de sensores brindan en cuanto monitoreo de salud estructural.

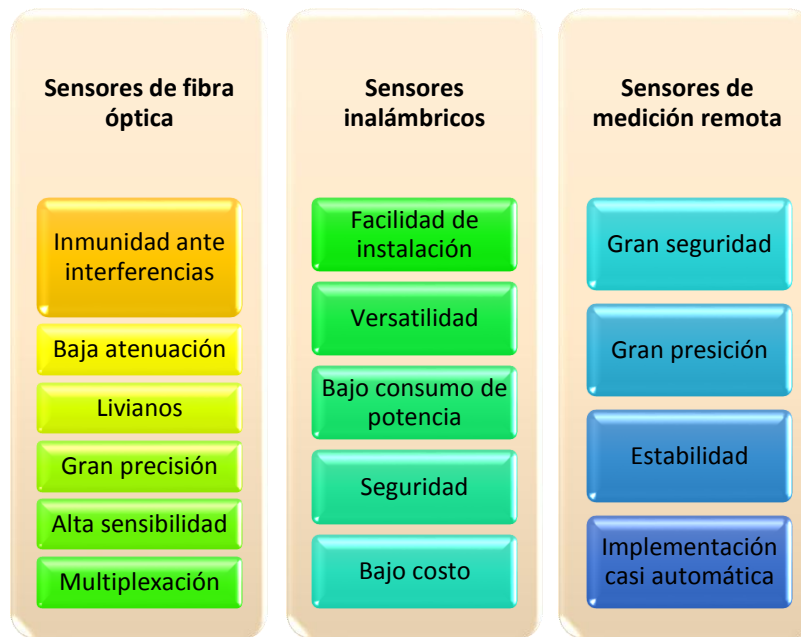


Tabla 2. Ventajas de sensores de fibra óptica, inalámbricos y de medición remota (15).

En la tabla 2, se puede visualizar a la vez las desventajas que cada uno de los sensores presentan con respecto a los otros, como se puede apreciar los sensores inalámbricos poseen grandes ventajas en comparación con los de fibra óptica y medición remota destacando primordialmente que este posee la característica principal de bajo costo, misma que los sensores antes mencionados no poseen y que hace de los sensores inalámbricos los dispositivos de mayor utilización en el campo de monitoreo y control de estructuras, razón por la cual fue seleccionado para la ejecución de este trabajo.

4.3.4 Red de sensores

Las redes de sensores se basan en la utilización de pequeñas computadoras que consisten en una serie de sensores esparcidos sobre la estructura a evaluar proporcionando información precisa y concisa sobre las condiciones reales de la misma, información que ciertas veces suele ser imperceptible a simple vista.

4.3.5 Redes De Sensores Inalámbricos (WSN)

Red con numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento o los contaminantes (23).

Las ventajas que presentan estas redes son entre muchas las que se detallan a continuación:

- ✍ Fiabilidad
- ✍ Bajo costo de instalación
- ✍ Movilidad
- ✍ Bajo consumo de potencia
- ✍ Modularidad

4.3.5.1 Elementos de una WSN

Una Red de sensores inalámbricos está compuesta por 5 elementos básicos como se muestra en la figura 11, mismos que son:

- ✍ **Sensores:** Proveniente de distintas naturalezas, encargado de tomar las diferentes magnitudes físicas y convertirlas en valores medibles (señales eléctricas).
- ✍ **Nodo sensor:** Elemento encargado de tomar los datos a través de sus puertos de datos y a continuación enviarlos a través del puerto tx a la estación base.
- ✍ **Gateway:** Elemento intermediario entre la red de sensores y la Gateway, es decir se encarga de la comunicación entre redes de diferente tipo.
- ✍ **Estación base:** Elemento encargado de la recolección de datos.
- ✍ **Red inalámbrica:** Hace posible la comunicación entre nodos, se basa comúnmente en el estándar 802.15.4 (*Zigbee*).

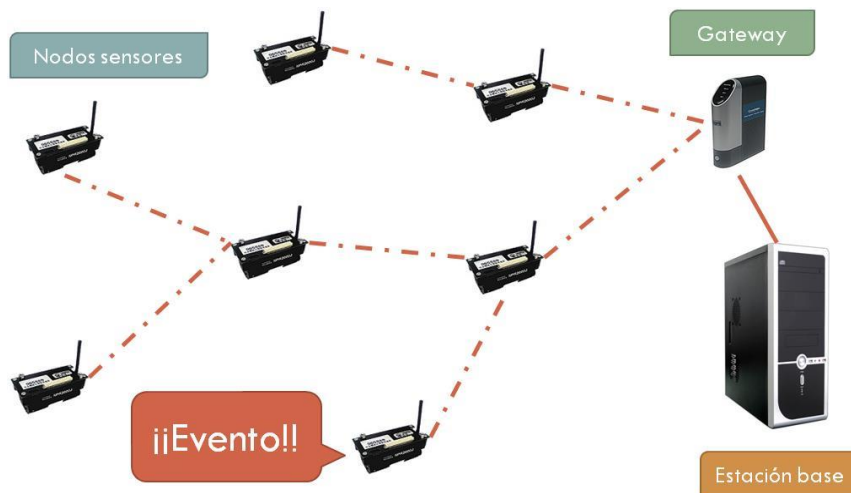


Figura 11. elementos que conforman una red de sensores inalámbricos (24).

4.3.5.2 Aplicaciones de una WSN

Una WSN se puede aplicar en los siguientes entornos:

- ✎ Entornos de alta seguridad como: aeropuertos, centrales nucleares, edificios gubernamentales, puentes, monitoreando el ruido acústico, radiaciones ionizantes y movimiento.
- ✎ Entornos ambientales como bosques u océanos, en los cuales se requiere tener un control de ciertos parámetros tales como: temperatura, humedad, vibraciones, etc.
- ✎ Entornos industriales para monitoreo y diagnóstico del funcionamiento de motores eléctricos y de combustión.
- ✎ Medicina mediante el control de las constantes vitales del paciente como pulsaciones, nivel de azúcar, presión arterial, etc.
- ✎ Tráfico, mediante estos se puede determinar la presencia de vehículos y controlar la estabilidad de la estructura sobre la que se deslizan (25).

4.3.5.3 Estándares orientados a una WSN

- ✎ *Bluetooth* (IEEE 802.15.1): Permite comunicaciones de radio de 720 kbps en radios de cobertura de entre 10 y 100 metros con un consumo de corriente de

40mA.

- ✎ *Zigbee* (IEEE 802.15.4): Permite transmisiones de datos de entre 20 a 250 kbps en radios de cobertura de entre 10 y 75 metros pudiendo alcanzar idealmente 1600 metros, soporta bandas de radio de 2400-2483,5 MHz (utilizado en todo el mundo) empleando 16 canales. También es compatible en las bandas de 868-868,8 MHz (Europa) y 902-928 MHz (Norte América). Este estándar es principalmente utilizado en sistemas de monitoreo y control.
- ✎ *Wimax* (IEEE 802.16): Permite trabajar a una tasa de transmisión de 70 Mbps en radios de cobertura de hasta 48 kilómetros a frecuencias de 2,5 y 3,5 Ghz.
- ✎ *Wifi* (IEEE 802.11): Permite transmisiones de datos de entre 11 Mbps (IEEE 802.11b) y 54 Mbps (IEEE 802.11g) y opera en las bandas de radio de 2,4 - 2,5 Ghz (13).

En base a las características de estos estándares, se selecciona el estándar Zigbee, el cual operaría con total estabilidad en el área establecida para el MSE, la cual se encuentra en aproximadamente 100 metros.

4.4 CAPÍTULO 4: ESTÁNDAR ZIGBEE (IEEE 802.15.4)

4.4.1 Definición

Estándar que define el nivel físico y control de acceso al medio de redes WLAN (*Wireless local area network*) con tasas bajas de transmisión de datos, desplegando redes con muy bajo consumo y bajo costo (26).

Provee gran ventaja en cuanto a ahorro energético, debido a la utilización de tramas *Beacon* cuya capacidad de información es de 16 bits, tramas que permiten sincronizar los dispositivos de la red para que puedan permanecer en modo ahorro de energía el mayor tiempo posible.

4.4.2 Características

- ✎ Bajo consumo de energía, 30mA durante su transmisión y 3uA cuando se encuentra en reposo.
- ✎ Dispositivos más ecológicos conforme avanza la tecnología *Zigbee*.
- ✎ Bajo costo en dispositivos, instalación y mantenimiento.
- ✎ Simplicidad que permite la creación de redes que requieren poco mantenimiento.
- ✎ Redes de alta densidad, permite que las redes manejen hasta 2^{16} dispositivos.
- ✎ Stack de protocolos simple.
- ✎ Comunicación inalámbrica confiable.
- ✎ Puede trabajar tanto en las bandas de 2.4GHz como en la de 868/915MHz.
- ✎ Tasa de transmisión de hasta 250 kbps en 2.4 GHz, 40kbps en 915MHz y 20 kbps en 868 MHz.
- ✎ Usa CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*) para acceso al canal.
- ✎ Produce alto rendimiento y baja latencia para dispositivos de bajo ciclo de trabajo, muy adecuado esto para sensores y controles.

- ✍ Baja potencia. Ideal para equipos a batería.
- ✍ Permite el uso de ranuras de tiempo (*time slots*) para posibilitar aplicaciones de baja latencia.
- ✍ Protocolo con *handshake* (diálogo) para mejorar la seguridad en las transferencias.
- ✍ Rango: hasta 50 m (valor típico, dependiendo del ambiente) (26).

4.4.3 Ventajas y desventajas

VENTAJAS

- ✍ Ideal para conexiones punto a punto y punto a multipunto.
- ✍ Diseñado para el direccionamiento de información y el refrescamiento de la red.
- ✍ Opera en la banda libre ISM de 2.4GHz.
- ✍ Ideal para redes con baja transferencia de datos, especialmente para monitoreo.
- ✍ Bajo ciclo de trabajo, esto debido a que puede trabajar en modo *sleep*.
- ✍ Bajo nivel de radiación, lo que facilita su uso en el ámbito médico.

DESVENTAJAS

- ✍ Baja transferencia de datos.
- ✍ Manipulación de baja cantidad de información, con respecto a otras tecnologías.
- ✍ Incompatibilidad con otras tecnologías y otras series, como por ejemplo la serie 1 no es compatible con la serie 2.
- ✍ Menor área de cobertura.

4.4.4 Capas del protocolo Zigbee

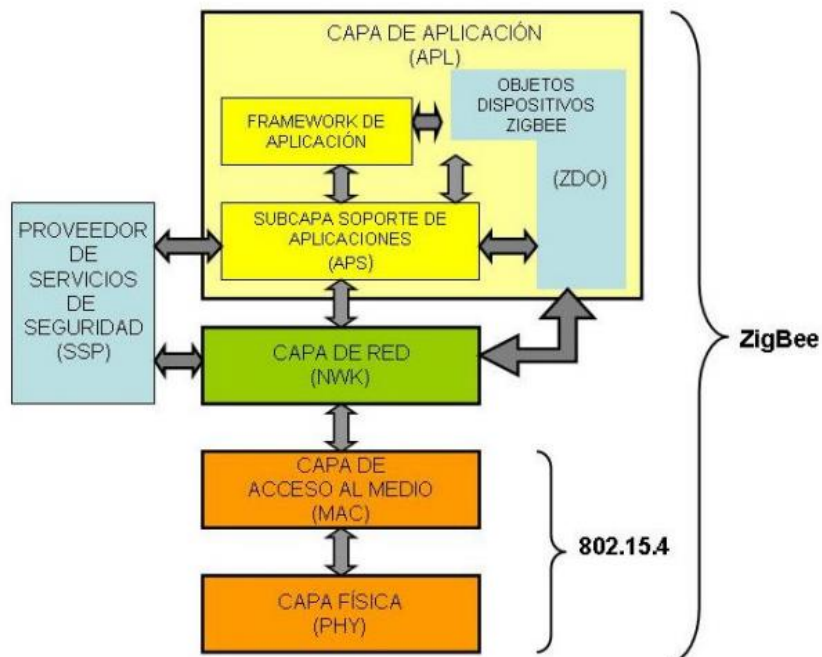


Figura 12. Capas de operación del protocolo Zigbee e IEEE 802.15.4 (27).

El protocolo Zigbee cuenta con 4 capas, como se muestra en la figura 12, las mismas que se basan en el modelo de referencia OSI. Se encuentra estructurado en 4 capas con el objeto de simplificar la arquitectura para el armado de una red de baja tasa de transmisión, simple y de bajo consumo (27).

En el estándar 802.15.4 está definido las 2 capas inferior del protocolo física y de control de acceso al medio (PHY y MAC respectivamente) las cuales en conjunto brindan los servicios de transmisión de datos por aire (27).

La capa de red (NWK) tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. Brinda los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos.

Se debe tener en cuenta que el algoritmo de enrutamiento que se usa es el de enrutamiento de malla, el cual se basa en el protocolo *Ad Hoc On-Demand Vector Routing – AODV* el

mismo que no almacena una base de datos de sus caminos, sino que en base a solicitudes crea constantemente los caminos disponibles en su base de datos reduciendo de esta manera el consumo de energía. La siguiente capa es la de soporte a la aplicación que es el responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red (28).

4.4.5 Seguridad en Zigbee

Como se conoce la seguridad es un tema que desde siempre ha tenido un especial interés, sin embargo, no se lo ha tomado como es debido en las instituciones y/o empresas con nuevas tecnologías, ocasionando con ello la pérdida de valiosa información y muchas de las veces hasta la arruina de la empresa.

Zigbee implementa su seguridad a nivel de capa MAC constando de:

- ✎ **Control de accesos:** En el que se mantiene únicamente una lista de los dispositivos conectados a la red.
- ✎ **Datos Encriptados:** Información que hace uso de 128 bits de encriptación.
- ✎ **Integración de tramas:** Protege la información a fin de evitar su modificación.
- ✎ **Secuencias de refresco:** Permiten Comprobar que las tramas no han sido reemplazadas por otras.

4.4.5.1 Modelo básico de seguridad.

En *Zigbee* se basa en la utilización de claves que permiten la integridad del sistema y por ende la protección de su información, dichas claves por la gran importancia que tiene no se envían por canales inseguros, a excepción de la fase inicial de configuración.

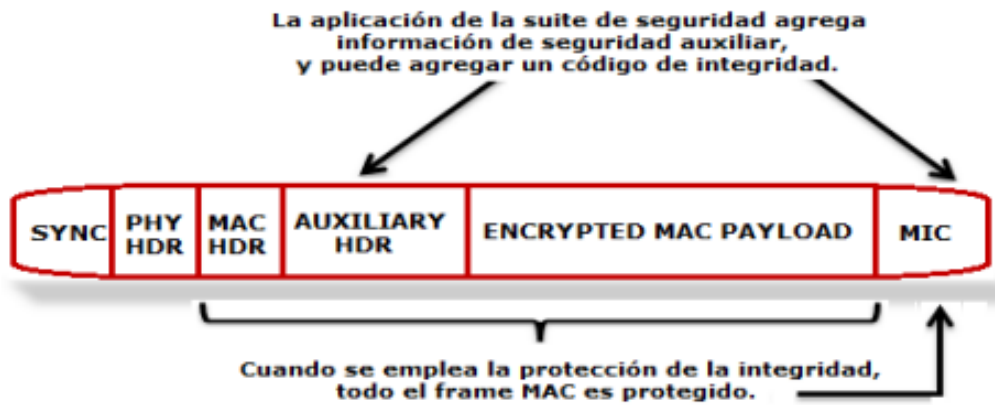


Figura 13. Encriptación utilizada para seguridad de información en *Zigbee* (29).

Los distintos niveles definidos dentro de la pila de protocolos no están separados criptográficamente, por lo que se necesitan políticas de acceso, que se asumen correctas en su diseño como se puede visualizar en la figura 13. Este modelo de confianza abierta (open trust) posibilita la compartición de claves disminuyendo el coste de forma significativa. No obstante, el nivel que genera una trama es siempre el responsable de su seguridad. Todos los datos de las tramas del nivel de red han de estar cifradas, ya que podría haber dispositivos maliciosos, de forma que el tráfico no autorizado se previene de raíz. De nuevo, la excepción es la transmisión de la clave de red a un dispositivo nuevo, lo que dota a toda la red de un nivel de seguridad único. También es posible utilizar criptografía en enlaces punto a punto (29).

4.4.5.2 Arquitectura de seguridad

Como se mencionó en el apartado anterior *Zigbee* se basa en la utilización de claves para su seguridad, en donde dichas claves son de 128 bits. Estas se establecen en base a una clave maestra que controla la correspondencia entre claves de enlace, la distribución de claves es una de las funciones de seguridad más importantes. Una red segura atribuye a un dispositivo especial la distribución de claves: el denominado centro de confianza o trust center (29).

La arquitectura de seguridad está distribuida entre los distintos niveles de la siguiente manera:

- ✦ El subnivel MAC puede llevar a cabo comunicaciones fiables de un solo salto. En general, utiliza el nivel de seguridad indicado por los niveles superiores.

- ✎ El nivel de red gestiona el ruteo, procesando los mensajes recibidos y pudiendo hacer broadcast de peticiones. Las tramas salientes usarán la clave de enlace correspondiente al ruteo realizado, si está disponible; en otro caso, se usará la clave de red.
- ✎ El nivel de aplicación ofrece servicios de establecimiento de claves al ZDO (claves de dispositivos *Zigbee*) y las aplicaciones, y es responsable de la difusión de los cambios que se produzcan en sus dispositivos a la red. Estos cambios podrían estar provocados por los propios dispositivos o en el centro de confianza, que puede ordenar la eliminación de un dispositivo de la red. El ZDO mantiene las políticas de seguridad del dispositivo (29).

4.4.6 Módulos *Xbee - Zigbee*

Este tipo de módulos es definido por su creador Digi como una solución integrada que brinda un medio inalámbrico permitiendo la interconexión y comunicación entre dispositivos, hace uso del protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 para crear redes punto a multipunto o redes punto a punto (30).

4.4.6.1 Características

- ✎ Formato de montaje superficial o enchufable.
- ✎ Múltiples protocolos y mismo formato.
 - Protocolo DigiMesh.
 - Protocolo punto a punto/multipunto.
 - Protocolo 802.15.4
 - Protocolo *Zigbee*.
 - Protocolo Wifi.
- ✎ Misma conexión.
- ✎ Intercambiabilidad entre módulos.

- ✎ Cambio de protocolo por cambio de módulos.
- ✎ GPIO digitales, PWM y entradas analógicas disponibles.
- ✎ Múltiples tipos de antenas.
- ✎ Se puede comunicar con comandos AT (modo transparente) o bien con comandos API (Interfaz de programación de aplicaciones) (30).

4.4.6.2 Series

- ✎ **XBee Series 1:** Llamados también *XBee 802.15.4*, son la serie más fácil para trabajar, no necesitan ser configurados sin embargo se pueden configurar en modo AT o API. El hardware de las Series 1 y las Series 2/2.5/ZB NO SON COMPATIBLES.
- ✎ **XBee Znet 2.5:** Conocidos también como serie 2, deben ser configurados antes de ser usados. Pueden funcionar en modo Transparente o por medio de comandos API, dependiendo del firmware configurado en el módulo.
- ✎ **ZB:** Serie 2 o Znet 2.5 mejorada, con un nuevo firmware el cual puede ser actualizado por el usuario funcionando normalmente en redes *mesh*. El firmware de modo API con el modo AT no son compatibles, por lo que se requiere trabajar con el mismo firmware en los equipos para un correcto funcionamiento.
- ✎ **2B:** Versión más actual de módulo Series2, son nuevos módulos que poseen mejoras en el hardware respecto de los de la Serie 2 mejorando incluso el nivel de potencia. Funciona con el Firmware del módulo ZB, pero debido al cambio de hardware, no pueden funcionar con el firmware del módulo Znet 2.5 (30).

Finalmente, de este tipo de series existen 2 variantes: Regular y Pro. Estas 2 difieren entre ellas en el consumo de potencia ya que el *XBEE PRO* alcanza una distancia de hasta 1.5Km consumiendo mayor potencia, mientras en su contra parte el *XBEE REGULAR* tiene un alcance de 9.6Km teniendo un ahorro en cuanto al consumo de energía. Estas 2 versiones son ampliamente compatibles entre sí.

4.4.6.3 Tipos de antenas

Existen 4 variantes de antenas para módulos XBEE, estos se muestran en la figura 14 y se detallan a continuación.

- ✦ **Chip Antenna:** Consiste en un pequeño chip que actúa como antena. Rápido, sencillo y barato.
- ✦ **Wire Antenna:** (*Whip Antenna*) Es un pequeño cable que sobresale.
- ✦ **u.FL Antenna:** Un conector pequeño para adaptar una antena externa. Esto es perfecto si se tiene el equipo en una caja y se requiere una antena externa.
- ✦ **RPSMA Antenna:** Un conector más grande para conectar antena externa y de fácil localización en el mercado. Este es perfecto si se tiene el equipo en una caja y se desea la antena afuera de ésta (31).



Figura 14. Tipos de antenas de módulos Xbee (31).

4.4.6.4 Modos de operación

Básicamente los módulos Xbee pueden operar en 5 modos, estos se muestran en la figura 15 y se detalla a continuación.

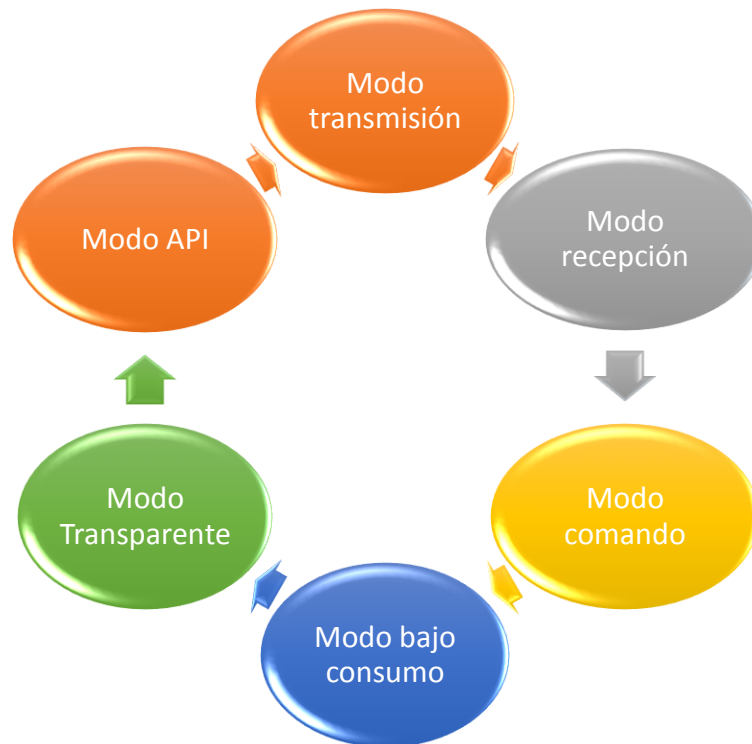


Figura 15. Modos de operación de módulos Xbee (32).

✦ **Modo Transmisión/Recepción**

Se encuentra en estos modos cuando al módulo *Xbee* le llega un paquete y requiere enviarlo a través del pin 3 del módulo, durante este modo el dispositivo consume aproximadamente 30mA.

✦ **Modo Comando**

Permite ingresar comandos AT al módulo *Xbee*, para configurar, ajustar o modificar parámetros. Para poder ingresar los comandos AT es necesario el uso de *Hyperterminal* de Windows, el programa X-CTU. Algunos de los comandos AT se detallan a continuación (32).

- ID: fija identificación de la red.
- CH: muestra el canal usado.
- DH/DL: fija dirección del remoto a transmitir.
- SH/SL: muestra la dirección del módulo.
- CI=12, modo *loopback*³.
- SM: modo de bajo consumo.
- SN: extiende el tiempo en modo *sleep*.
- SO: tiempo en modo *sleep*.
- ST: tiempo de modo activo luego de modo *sleep* (31).

✎ **Modo de bajo consumo (Modo *sleep*)**

Este modo hace posible que el módulo *Xbee* entre en un modo de bajo consumo de energía cuando no se encuentra en uso, con un consumo aproximado de 3uA. Para poder ingresar a este modo, se debe cumplir una de las siguientes condiciones:

- Sleep_RQ (pin9) está en alto y el módulo está en pin sleep mode (SM= 1, 2 o 5).
- El módulo está en reposo (no hay transmisión ni recepción de datos) por la cantidad de tiempo definido por ST (Time before Sleep). [ST sólo está activado cuando SM=4,5].

La configuración de los ciclos de sueño se realiza principalmente con el comando SM. Por defecto, los modos de sueño están deshabilitados (SM=0), permaneciendo el módulo en estado de reposo/recepción (32).

³ **Loopback:** interfaz de red virtual que permite el diagnóstico de conectividad y validez de la red de comunicación.

✦ **Modo transparente**

Los datos que ingresan al módulo son almacenados en el buffer de entrada para luego ser enviados en la misma forma en que se recibieron. Este modo viene configurado por defecto en los módulos Xbee.

Este modo está destinado principalmente a la comunicación punto a punto, donde no es necesario ningún tipo de control. También se usa para reemplazar alguna conexión serial por cable, ya que es la configuración más sencilla posible y no requiere una mayor configuración (31) (32).

✦ **Modo API**

Este modo es más complejo, debido a que hace uso de frames (tramas) con cabeceras que aseguran la entrega de los datos, de manera similar al protocolo TCP. Durante este modo toda la información que ingresa o sale es encriptada.

Entre las opciones que permite el modo API, se tienen:

- Transmitir información a múltiples destinatarios, sin entrar al modo de Comandos.
- Recibir estado de éxito/falla de cada paquete RF transmitido.
- Identificar la dirección de origen de cada paquete recibido (32).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la ejecución de este trabajo, finalmente, en base a las características detalladas en la revisión de literatura, se decidió seleccionar la red de sensores inalámbricos WSN basadas en la utilización del estándar Zigbee, haciendo uso de sensores convencionales, los mismo que para la ejecución de este trabajo tienen un desempeño totalmente estable. Los componentes de los nodos utilizados en la red, se detalla a lo largo de esta sección.

5.1 SIMULADOR DE RED

Dentro de los métodos utilizados se encuentra la simulación de la red, la misma que nos permitirá obtener una visión más clara de la topología de red a utilizarse para el monitoreo, sin embargo, existen diferentes programas que brindan gran facilidad y simplicidad en la simulación de una red. A continuación, se presenta una tabla comparativa entre las diferentes plataformas de simulación de redes inalámbricas, entre ellas la red que hace uso del protocolo IEEE 802.15.4 *Zigbee*.

CARACTERÍSTICAS	OPNET	OMNET++	NS2
Uso investigativo	Alto	Alto	Alto
Tipo de licencia	Comercial	Libre	Libre
Plataformas de soporte	Windows, Unix	Windows, Unix	Linux, Windows, Mac, Unix
Interfaz gráfica	Alta	Media	Baja
Curva de aprendizaje	Alta	Alta	Alta
Soporte de tecnologías de nivel dos y tres	Alto	Alto	Alto
Tráfico que permite modelar	Alto	Alto	Alto
Documentación disponible	Alta	Media	Alta
Nivel de complejidad	Medio	Alto	Medio

Tabla 3. Comparación entre plataforma de simulación de red *Zigbee* (33).

Como se muestra en la tabla 3, las plataformas que proveen mayor disposición al usuario son OPNET y NS2. Al realizar una comparación entre ellas, se encuentran 2 diferencias acentuadas, las mismas que radican en la licencia y la interfaz que el simulador presenta.

Tomando en cuenta estas diferencias y la aplicación en el prototipo, se selecciona el simulador OPNET el mismo que provee una interfaz más amigable para el usuario y el cual cuenta con una versión para el uso de estudiantes.

5.1.1 Simulador OPNET

Lenguaje de simulación orientado a las comunicaciones capaz de simular una gran variedad de redes, contando con opciones como flujos de mensajes de datos, paquetes perdidos, mensajes de flujo de control, caída de los enlaces, tráfico enviado/recibido, número de saltos, entre otras, brindando una forma efectiva de demostrar el funcionamiento de redes como: ATM, *frame relay*, *Zigbee*, *Wimax* y protocolos como: IP, BGP, RIP, OSPF, IS-IS, entre otros (34).

Se basa en jerarquías para poder plantear las simulaciones. A continuación, en la figura 16 se observa las jerarquías de diseño, en donde se tiene un modelo de red en el cual se definirán las redes y subredes de la simulación prestando las herramientas necesarias para la configuración de cada componente de la red y/o subred. Seguidamente se dispone de un modelo de nodos donde se define la estructura interna de estos ya que puede contar con varios módulos en su interior y finalmente se tiene el modelo de procesos, en el cual se definen los estados que definen un nodo; estos 2 últimos modelos se encuentran disponible únicamente en la versión pagada del simulador, por lo que se hará uso únicamente del modelo de red.

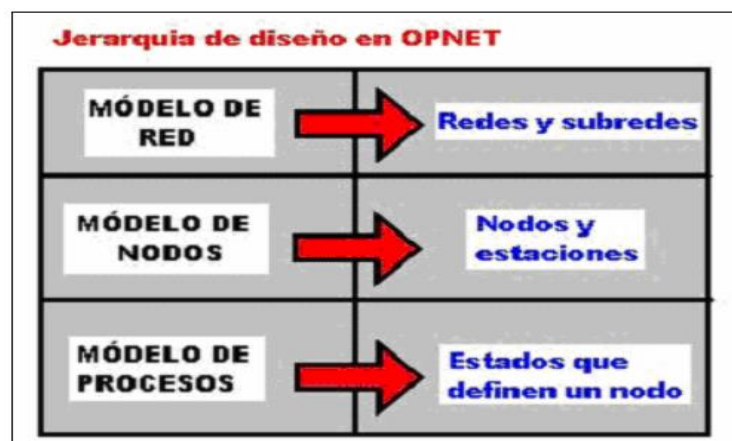


Figura 16. Jerarquías de diseño en OPNET (35).

5.1.1.1 Instalación

Debido a su compatibilidad con el sistema operativo Windows, se decidió descargar la versión académica para este sistema operativo. A continuación, se describe paso a paso el proceso de instalación de este simulador.

- ⚡ Se debe descargar el ejecutable de la página web destinada a versión académica del simulador. Ingresando al siguiente link, como se muestra en la figura 17. http://www.opnet.com/university_program/itguru_academic_edition/install_software.html

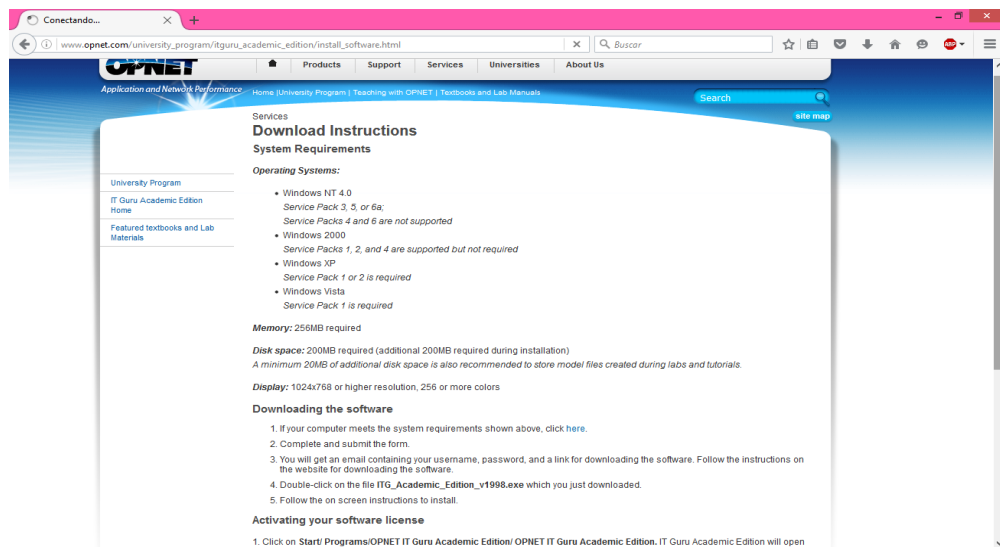


Figura 17. Pantalla principal de descarga del simulador OPNET.

Fuente: Elaboración propia.

- ⚡ Se da clic en el vínculo “here”, para dar inicio a la descarga
- ⚡ Se debe registrar en la página para poder descargar la versión académica.
- ⚡ A continuación, llega un enlace al correo el cual permitirá descargar el programa.
- ⚡ Después de haber descargado el programa se procede a la instalación ejecutando el archivo .exe descargado y aparecerá una pantalla como se muestra en la figura 18.

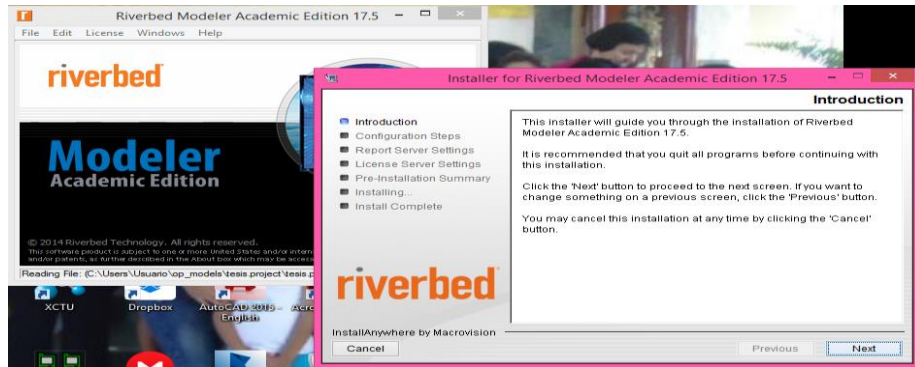


Figura 18. Pantalla de instalación del simulador OPNET.

Fuente: Elaboración propia.

- ✎ Se da clic en “Next” (siguiente) para que se realice la instalación en el computador.
- ✎ Una vez instalado el programa, se procede a ejecutarlo y aparecerá una pantalla como se muestra en la figura 19, en la que se puede observar que el programa es destinado únicamente para uso académico.

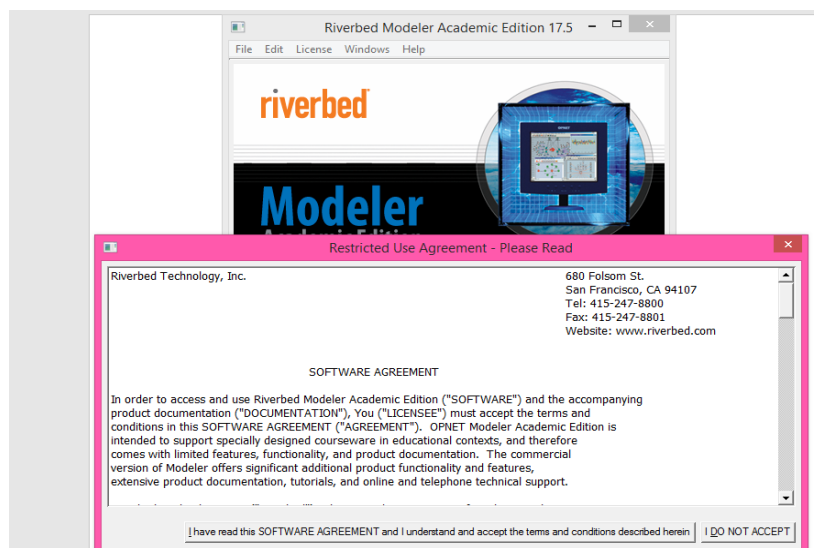


Figura 19. Pantalla de inicio del simulador OPNET.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2 Simulación de redes en OPNET

Para realizar la modelación de las diferentes topologías de red en el simulador se debe ejecutar el programa e ingresar a la pestaña “File”, en donde se desplegarán una serie de

opciones entre las cuales se deberá seleccionar la opción “New”. A continuación, aparecerá una pantalla como la que se muestra en la figura 20, en ella se debe ingresar el nombre del proyecto y nombre del primer escenario, en este caso sería el nombre de la topología a simular.

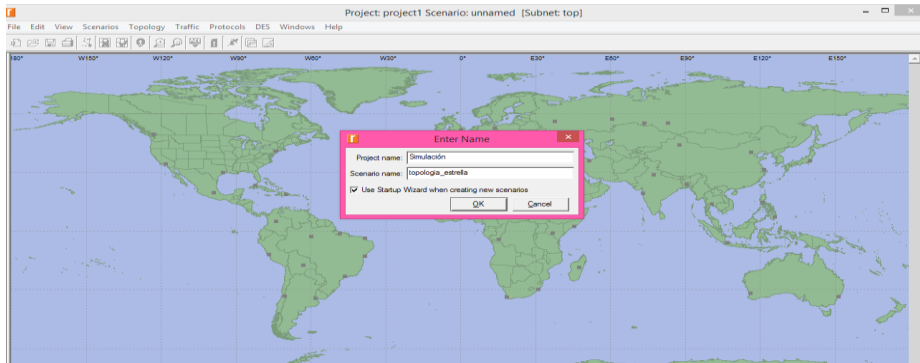


Figura 20. Pantalla de inicio de simulación de redes.

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente aparecerá una pantalla como la que se muestra en la figura 21, en la cual se deberá seleccionar el área de trabajo o tipo de red que se desea modelar. En este caso se selecciona la opción “Office”, ya que cubre perfectamente el área de la red a desarrollar.

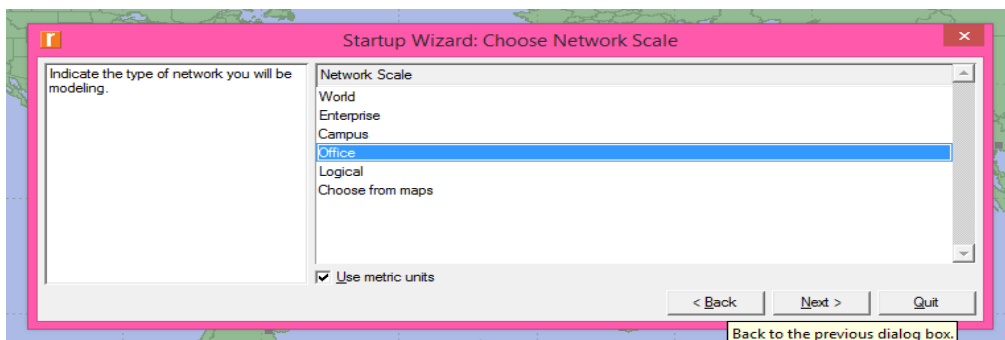


Figura 21. Pantalla de inicio de simulación de redes, selección de área de trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se da clic en “Next”, aparecerá una pantalla como la figura 22 en la cual se debe activar la opción *Zigbee* para poder hacer uso de este protocolo en la simulación, seguidamente se da clic en “Next” para finalmente dar clic en “Finish” para iniciar la simulación de las topologías de red.

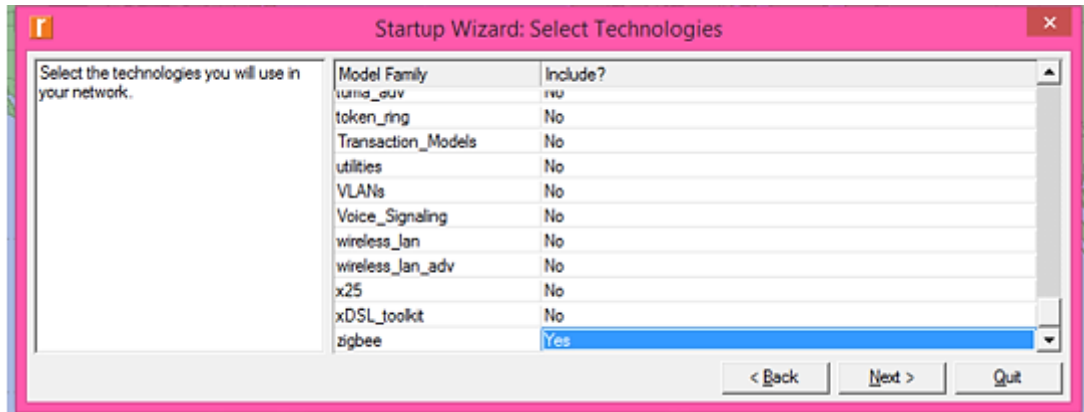


Figura 22. Pantalla de selección de protocolo a utilizar en la simulación.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez inicializado el escenario para la simulación de la red, se procede a la creación de la misma. Como se observa en la figura 23 se seleccionan los componentes de la red, ya sean nodos coordinador, router o dispositivo terminal.

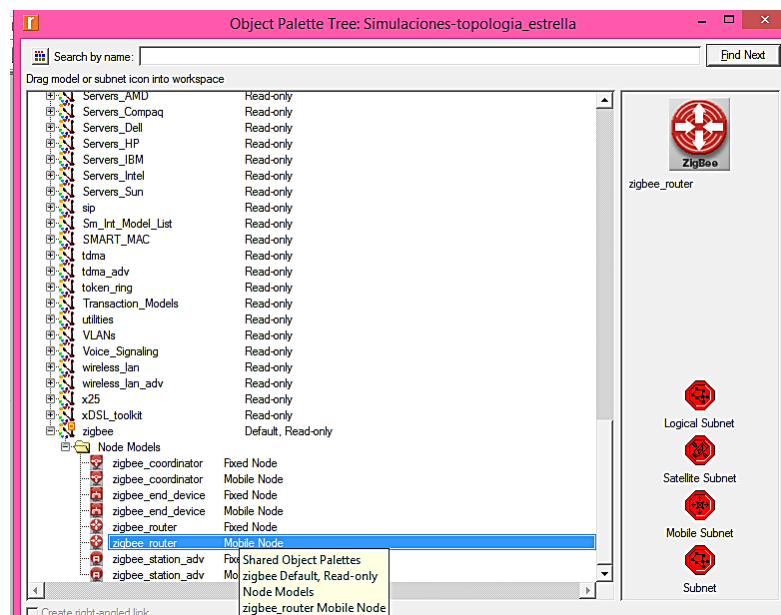


Figura 23. Pantalla de selección de componente de una red *zigbee*.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez elaborada la red, como se muestra en la figura 24 literal a, se procede a configurar cada uno de los nodos que la componen. Para ello se realiza clic derecho sobre cada componente y se selecciona la opción “edit attributes” con lo que aparecerá una tabla de atributos como la que se muestra en la figura 24 literal b, esta tabla contendrá toda la

información referente al nodo, en este caso se refiere al nodo coordinador, de entre los cuales destacan: potencia de radiación, número de nodos tipo router que soportará la red, ID de la red, parámetros de red en los cuales hace hincapié a la topología de red a ser simulada, cabe destacar que este último parámetro se hallará disponible únicamente en el nodo coordinador de red.

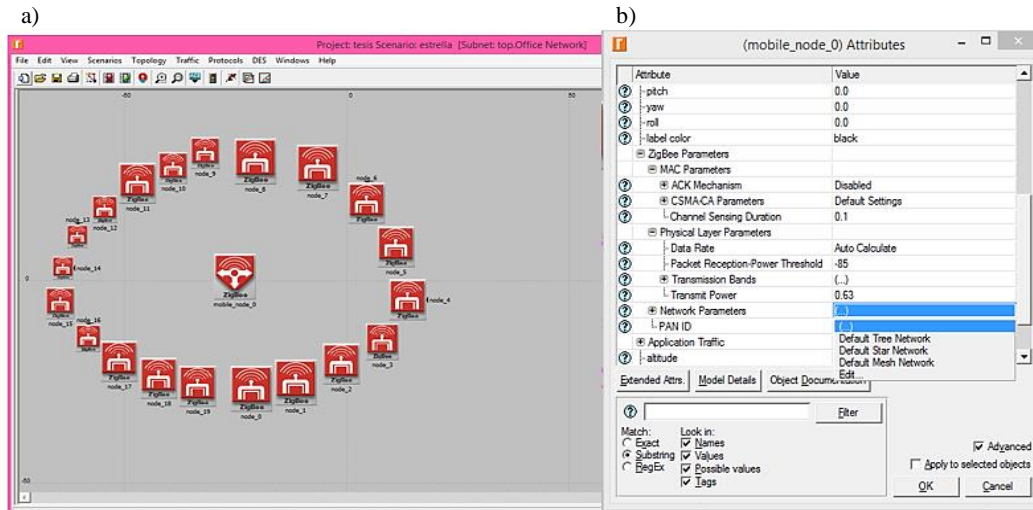


Figura 24. a) Red de sensores modelada, b) tabla de atributos del nodo coordinador.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, una vez definida la topología de red con sus respectivos parámetros, se puede observar la conexión configurada, esto se logra al hacer clic en la pestaña “Protocols”, seguidamente clic en “Zigbee” y clic en “Visualize tree structure”, como se muestra en la figura 25, aparecerá una pantalla en la cual se debe activar el display para poder visualizar la topología configurada.

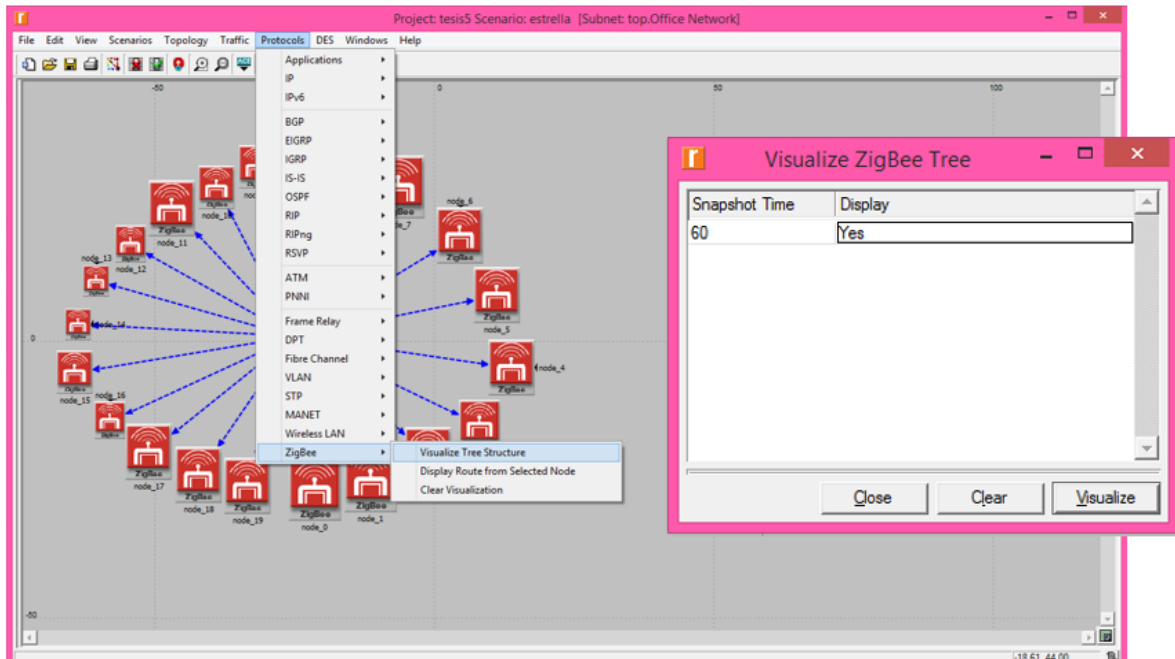


Figura 25. Visualización de topología de red configurada.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 PARÁMETROS A EVALUAR DURANTE UNA SIMULACIÓN DE RED

Existen varios parámetros a evaluar durante el funcionamiento de una red de comunicaciones inalámbricas, tales como: rendimiento, número de nodos, área de servicio, consumo de energía, robustez, facilidad de desplazamiento, configuración dinámica, entre otros. Entre las cuales se destacan:

- ✎ **Throughput:** También conocido como la velocidad efectiva, se refiere a la velocidad final con la que cada uno de los nodos que componen la red enviarán la información hacia su nodo coordinador. Esta velocidad normalmente es inferior a la velocidad pico de la red y se encuentra definida por la ecuación 1.

$$\text{Throughput: } \frac{\sum \text{Bits de información}}{\text{Tiempo total}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

- ✎ **End to End Delay:** Se define como el tiempo en que tarda un paquete en llegar desde un nodo final hasta el nodo coordinador. Se define por la ecuación 2.

$$\text{Delay: } \frac{\sum \text{Tiempo en que recibe la inf.} - \text{tiempo de envío}}{\text{Número de conexiones}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

- ✎ **Hops (Número de saltos):** Se refiere al número de nodos que un paquete de información deberá atravesar hasta llegar a su destino.

✎ **Tráfico de paquetes:** Hace hincapié a paquetes ya sea enviados, recibidos, desechados o reenviados por los nodos que componen la red.

5.3 DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES A MONITOREAR Y UBICACIÓN DE SENSORES

Para determinar la ubicación de cada uno de los nodos y especialmente de los sensores, se realiza el método de observación de la estructura y su funcionamiento, en el cual, se busca encontrar un lugar estratégico para la correcta ubicación de cada uno de los componentes de monitoreo, con la finalidad de que los datos alcanzados proporcionen una correcta información acerca de las condiciones en las que se encuentra la estructura.

Los puntos estratégicos a los cuales se hace referencia se definen en base a las condiciones en las que se encuentre la estructura, por lo que durante la observación se procede a verificar de entre las variables descritas cuál de ellas está principalmente afectando a la misma. Este método fue realizado con ayuda del Ing. José Eduardo Cango Director de obras públicas del GAD de Catamayo, profesional en ingeniería civil e interesado en conocer las características cuantitativas de la estructura.

Al realizar la inspección visual se pudo apreciar que el puente se ve afectado principalmente por la socavación que presenta uno de sus estribos, por lo que en base a ello y en base a que es una de las variables que afecta más a un puente, se procede a decidir junto al profesional en materia, que las variables a monitorear en la estructura serán: estabilidad en el cual se obtendrá el ángulo de inclinación de la estructura en 2 ejes, vibración en el cual se medirá básicamente los tiempos de vibración en la estructura en base a los tipos de vehículos que circulan sobre la misma y humedad en el estribo socavado en el cual se medirá el porcentaje de humedad relativa (RH).

En la tabla 4 se presenta los rangos de valores típicos de las variables a monitorear, mismos que fueron establecidos con ayuda del Ing. Cango, en base a su experiencia profesional y en base a las “ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES (MOP – 001 – F2002, especificación 405-9.8 literal c)”.

VARIABLES	VALORES NORMALES
Estabilidad (Ángulo de inclinación)	80° - 100°
Humedad	40% - 60%
Temperatura	15°C – 29°C
Tiempo de vibración (vehículos livianos)	0.1 – 1 seg.
Tiempo de vibración (vehículos de 2 ejes)	1 – 3 seg.
Tiempo de vibración (vehículos de 3 ejes)	3 -5 seg.

Tabla 4. Valores normales de las variables a monitorear en la estructura.

Fuente: http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf

El ángulo de estabilidad se mide en base a un vector imaginario ubicado de forma perpendicular al puente formando un ángulo de 90° durante su estabilidad, este se puede visualizar en la figura 26 como α y β .

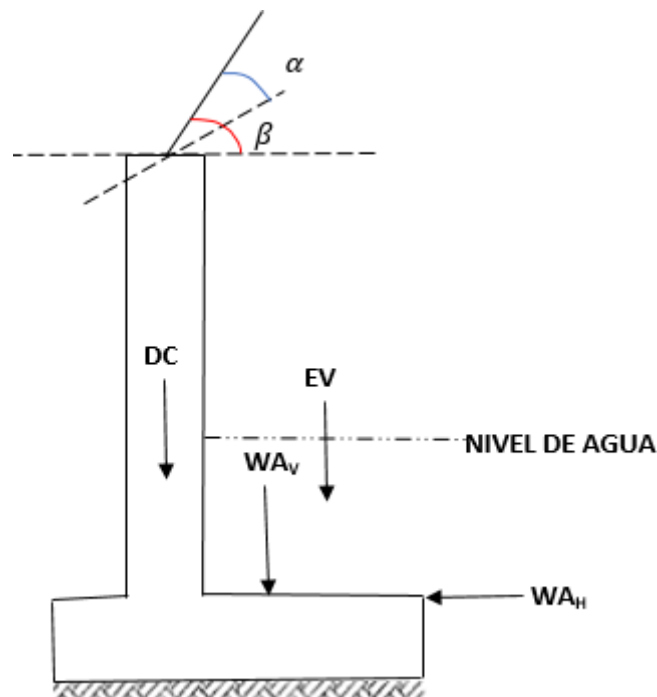


Figura 26. Ángulo de estabilidad en 2 ejes medido sobre la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como resultado de la inspección se determina que los puntos idóneos para la realización del monitoreo de las variables seleccionadas son:

- ✎ **Nodo sensor 1:** Nodo sensor de estabilidad 1, colocado en el estribo derecho aguas abajo.
- ✎ **Nodo sensor 2:** Nodo sensor de estabilidad 2, ubicado en la parte central de la estructura.
- ✎ **Nodo sensor 3:** Nodo sensor de estabilidad 3, ubicado en el estribo izquierdo aguas abajo.
- ✎ **Nodo sensor 4:** Nodo sensor de humedad y temperatura, ubicado en el estribo izquierdo aguas abajo, ya que al presentarse socavación en este estribo la estructura podría obtener mayor humedad en este extremo.
- ✎ **Nodo sensor 5:** Nodo sensor de vibración, ubicado entre el nodo sensor 2 y 3 cerca del estribo izquierdo.

En la figura 27 se pueden visualizar las ubicaciones de los nodos descritos sobre la estructura y que se muestran en forma de pequeños cajetines blancos.

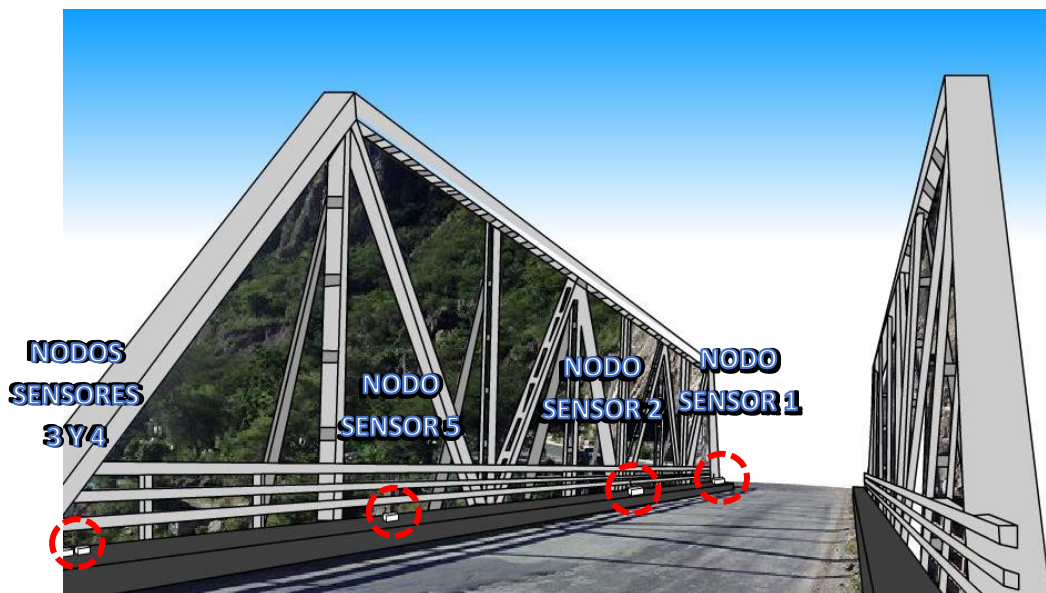


Figura 27. Ubicación los diferentes nodos sensores sobre la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 DISEÑO Y ESTRUCTURACIÓN DEL PROTOTIPO

Para el monitoreo de la estructura objeto de investigación se diseña un prototipo el cual está formado de 2 partes fundamentales: hardware y software. Dentro del hardware a utilizar se hace uso de criterios de diseño que permitan la correcta selección de la instrumentación, a fin de elegir aquellos instrumentos que presten los mayores beneficios, para ello, es preciso conocer cuáles son sus características técnicas, la función que realizará dentro de la red y los componentes de los cuales depende su funcionamiento, además, es necesario tener una idea clara del estándar a utilizar para la creación de la red ya que esta permitirá determinar los nodos de los cuales estará compuesta. Dentro del software a utilizar es necesario determinar aquel que presente ventajas al usuario, tales como: flexibilidad, compatibilidad con el hardware a utilizar y sin límites de uso, este permitirá el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario a fin de presentar los datos obtenidos a través del hardware de una manera más amigables, así como también permitirá la creación de la rutina a seguir por cada nodo de la red para su buen funcionamiento. Detalles a profundidad del prototipo de monitoreo como: su composición, configuración, forma de operación, y componentes, se presenta en las secciones a continuación.

5.4.1 Hardware – detalles técnicos de implementación

Para el diseño del prototipo, referente a hardware, se debe considerar principalmente los siguientes aspectos:

- ✎ **Fuente de alimentación:** Es uno de los puntos más desafiantes a considerar dentro de una WSN pues este principalmente debe suministrar energía a la red en lugares donde no se precisa de una fuente de alimentación constante. Para el diseño de la red este debe ser seleccionado principalmente en base a las características eléctricas de los componentes a utilizar, considerando un periodo de tiempo suficiente para su cambio o abastecimiento. Basándose en este criterio, se puede considerar el uso de dispositivos basados en el estándar Zigbee los cuales poseen como característica principal el bajo consumo de energía durante su operación, debido a que permite su configuración en modo sleep reduciendo de esta manera el consumo de energía de la red.

- ✎ **Rendimiento:** El cual estará definido en función de la cantidad de información que la red deberá transportar, destacando que la red a diseñar hará uso de bajas tasas de transferencias de datos, se sabe que Zigbee permite la transmisión de información de próximamente 20 a 250 kbps y está principalmente enfocado a aplicaciones de control y monitoreo por lo que se propone la utilización de dispositivos Xbee basados en el estándar Zigbee para tener un rendimiento estable en el establecimiento de la red.
- ✎ **Seguridad:** Se seleccionarán los dispositivos que compondrán la red en base a este parámetro, ya que hoy en día juega un rol fundamental en toda sociedad, este parámetro permitirá la protección de la información obtenida a través de la red de sensores a fin de evitar la alteración de la misma por terceras personas. Nuevamente el estándar Zigbee considera este parámetro entre sus características principales al hacer uso del modo API en el cual encripta la información en tramas de 128 bits que poseerán las características principales del nodo desde y hacia el cual fueron transmitidas. Motivo por el cual se decide la utilización de dispositivos Xbee en la ejecución de este trabajo.
- ✎ **Implementación:** Referida principalmente al espacio a utilizar dentro del nodo y en el lugar de monitoreo a fin de evitar su difícil manipulación.
- ✎ **Tipos de nodos:** Se selecciona en base al rol que cada nodo va a desempeñar dentro de la red, basándose en una topología en estrella se hará uso principalmente de 2 tipos de nodos, nodo sensor el cual cumplirá con la función de recolección y transmisión de datos y nodo coordinador que básicamente se encargará de la recolección de toda la información enviada por los nodos sensores que compondrán la red.

Dentro del hardware considerado para el prototipo de monitoreo se pueden detallar varios componentes principales dependiendo del nodo al cual se esté haciendo hincapié, existirán 2 tipos de nodos en los cuales sus componentes variarán en ciertas características, estos se describen a continuación.

5.4.1.1 Nodo Sensor

El nodo sensor se basa en 5 componentes principales como se muestra en la figura 28.



Figura 28. Componentes de un nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

✎ **Unidad de sensado:** Como se observó en la revisión de literatura, esta unidad se encarga de convertir una magnitud física en un valor medible de dicha magnitud, este deberá cumplir con características como: precisión, velocidad de respuesta, sensibilidad, estabilidad, entre otras, pues de ella dependerá la recolección de información confiable durante el monitoreo de SE.

Cada uno de los nodos sensores cuentan con su propio dispositivo sensor, como: sensor de estabilidad, sensor de humedad y sensor de vibración. Estos se describen a continuación.

- **Sensor de estabilidad**

Para la medición de la estabilidad en los nodos sensores 1, 2 y 3, se utilizó un acelerómetro Adxl345 el cual permitirá determinar el ángulo de desplazamiento de la estructura en base a un ángulo de inclinación en el eje x como en el eje y. Estos sensores son dispositivos que miden la aceleración, que es la tasa de cambio de la velocidad de un objeto. Esto se mide en metros por segundo al cuadrado (m/s^2) o en las fuerzas G (g). Este se muestra en la figura 29 y sus características técnicas se detallan en la

tabla 5 (36).

Se seleccionó este dispositivo ya que debido a sus características técnicas su funcionamiento será estable y proporcionará información confiable en el lugar de implementación.

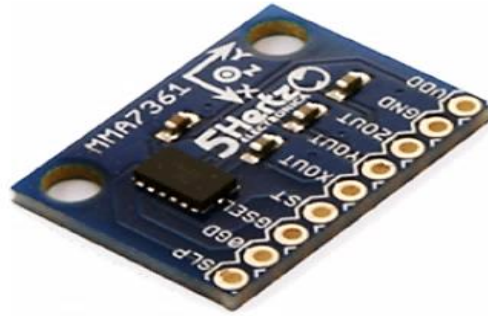


Figura 29. Sensor de estabilidad, acelerómetro adxl345 (36).

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Rango	+16g y -16g
Interfaz	Digital SPI/I2C
Ejes	3
Alimentación	2 a 3.6 V y 40 uA
Rango de temperatura	-40 °C a 105 °C
Características especiales	2 pines de interrupción.

Tabla 5. Característica del sensor de estabilidad, adxl345 (37).

○ **Sensor de humedad**

El sensor de humedad utilizado es el sensor Dht11, el cual permite la recolección de información acerca de los niveles de humedad presentes en el hormigón de la estructura, fue necesario verificar de entre varios dispositivos sensores con el fin de obtener datos reales de la estructura esto es debido a que no todos los sensores de humedad nos permiten el monitoreo de este parámetro en una estructura. La ubicación de este sensor se realiza bajo la estructura tratando de cerrar todo espacio a fin de que la humedad detectada sea precisamente la de la estructura. Este tipo de sensor

nos permite medir además un parámetro adicional, la temperatura, este se muestra en la figura 30 y sus características técnicas se detallan en la tabla 6.



Figura 30. Sensor de humedad, Dht11 (38).

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Rango de temperatura	0 a 60 °C
Precisión de medida	+ - 1°
Rango de RH	0 a 60 %
Precisión de medida	+ - 5%
Alimentación	5V
Largo	12 mm
Ancho	5.5 mm
Altura	15.5 mm
Resolución	-16 bits

Tabla 6. Característica del sensor de humedad, dht11 (38).

○ **Sensor de vibración**

El sensor utilizado para la detección de vibración es el módulo sensor sw-420, el cual se basa en un sensor de inclinación sw-420, un comparador lm393 y una resistencia variable, que permiten detectar un pequeño movimiento al superar un umbral establecido en base al ajuste de sensibilidad del sensor con ayuda de la resistencia variable. Este sensor se muestra en la figura 31 junto a su esquema electrónico y sus características técnicas principales se especifican en la tabla 7.

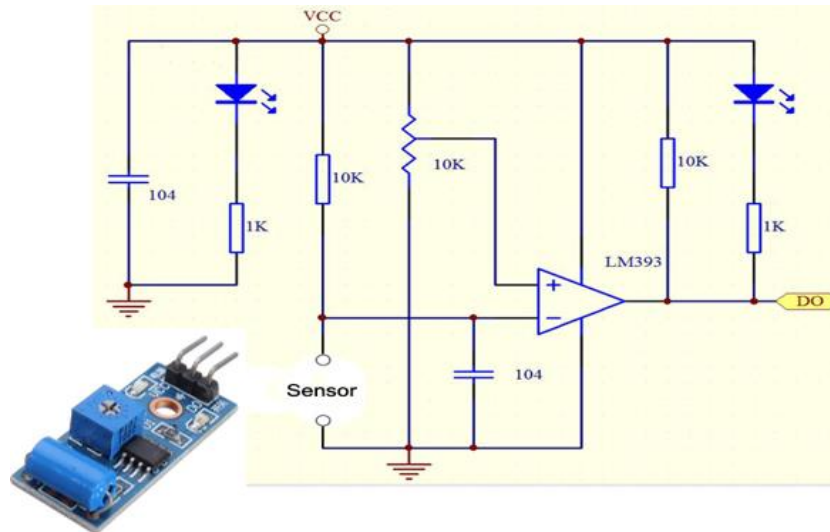


Figura 31. Sensor vibración, sw-420 (39).

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Comparador	LM393
Sensor	Sw420
Salida	Digital
Alimentación	3.3 a 5V
Largo	3.2 cm
Ancho	1.4 cm

Tabla 7. Característica del sensor de vibración, sw420 (39).

✎ **Unidad de procesamiento:** Esta unidad, así como el resto de unidades es de vital importancia en el funcionamiento del nodo sensor, ya que se encarga especialmente de la interpretación y adecuación de la información que se obtiene a través de la unidad de sensado, además de proporcionar la energía necesaria para la unidad de acondicionamiento. La unidad de procesamiento seleccionada en los nodos sensores es una placa Arduino Uno v1.8.1 el cual es una plataforma computacional física *open-source* basada en una simple tarjeta de I/O y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje *Processing/Wiring* (40), esta unidad se seleccionó en base a sus excelentes características técnicas, además de que aporta el nivel de alimentación que precisa la unidad de comunicación, el cual se detalla posteriormente.

Este se muestra en la figura 32 y sus especificaciones técnicas se detallan a continuación en la tabla 8.



Figura 32. Arduino Uno, unidad de procesamiento (40).

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada (límite)	6 – 20 V
E/S digitales	14 pines
Pines I/O PWM digitales	6 pines
Pines de I/O analógicos	6 pines
CC para pines I/O	20 Ma
CC para pines de 3.3 V	50 Ma
Memoria flash	32 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Largo	68.6 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g

Tabla 8. Características técnicas de la unidad de procesamiento (40).

Dentro del procesamiento realizado por esta unidad se encuentra la interpretación de la información, como la que se muestra en la figura 33, en la cual existirá una parte en la que se le da cierto grado de seguridad a la información que posteriormente será transmitida, esto consiste en inicializar un

vector al cual no solo se le agregará la información recolectada por la unidad de sensado sino además se le agregará 2 constantes, una de inicio y otra de fin, las mismas que variarán dependiendo del nodo sensor.

```

#include <Wire.h>
#include <ADXL345.h> //Importación de librerías necesarias para el funcionamiento del sensor
ADXL345 adxl; //Se llama las variables de la librería
//declaración de variables
int x, y, z;
int rawX, rawY, rawZ;
int mappedRawX, mappedRawY;
byte cadena[4];
int crx=0;
int cry=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600); //inicialización de la comunicación serial
  adxl.powerOn(); // se definen los pines de entrada y salida, según se han definido en la librería
}

void loop() {
  adxl.readAccel(&x, &y, &z); //Lectura de los 3 ejes de sensor
  rawX=map(x,-440,183,0,180); //Normalización de los valores obtenidos en un rango de 0° a 180°
  rawY=map(y,-310,301,0,180);
  //Se llena una cadena para el envío de información con cierto nivel de seguridad
  cadena[0]='e';
  cadena[1]=(rawX);
  cadena[2]=(rawY);
  cadena[3]='f';
  if ((rawX>crx+1) || (rawY>cry+1) || (rawX<crx-1) || (rawY<cry-1)){
    crx=rawX;
    cry=rawY;
  }
  cadena[0]='e';
  cadena[1]=(crx);
  cadena[2]=(cry);
  cadena[3]='f';
  // Se realiza el envío de la trama de información
  Serial.write(cadena,4);
  delay(500);
}

```

Figura 33. Procesamiento realizado en uno de los nodos sensores.

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de flujo en el cual se basa la recolección de información en la unidad de sensado, se detalla en la figura 34.

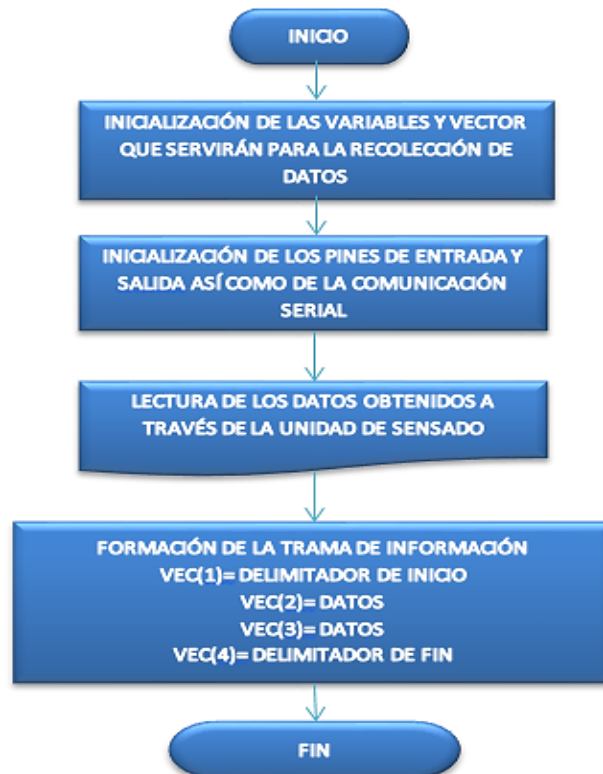


Figura 34. Diagrama de flujo del procesamiento realizado por la unidad de procesamiento.

Fuente: Elaboración propia.

✎ **Unidad de acondicionamiento:** La finalidad de esta unidad básicamente es crear un vínculo entre la unidad de procesamiento y >ión requerida por la unidad de transmisión.

El dispositivo seleccionado para realizar la función de esta unidad es el *Shield Xbee* pro v1.1, el cual consiste en una placa que al conectarse a un arduino permite su comunicación inalámbrica a través de *Zigbee*, este fue seleccionado en base a sus características técnicas y compatibilidad con la tarjeta de procesamiento a utilizar. Esta unidad se muestra en la figura 35 a continuación.



Figura 35. Shield Xbee pro v1.1.

Fuente: Elaboración propia.

✎ **Unidad de transmisión:** Esta unidad es de gran importancia puesto que se encargará especialmente de la comunicación con su nodo coordinador, las características como potencia, tiempo de vida, estabilidad de esta unidad deben ser tales que permitan la cobertura necesaria para el monitoreo de la salud estructural del puente, cobertura que se encuentra en el rango de 100m.

Considerando los requerimientos de la red a ser establecida se ha seleccionado el módulo Xbee Pro S2B con conector RP-SMA que se muestra en la figura 36, el cual debido a sus excelentes características las cuales se detallan en la tabla 9 garantizan el establecimiento fiable del enlace de comunicación y la movilidad del nodo, ya que al colocar una antena externa se puede mejorar las características de la red.



Figura 36. Xbee Pro S2B.

Fuente: Elaboración propia.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS XBEE PRO S2B		
Rendimiento	Cobertura en interiores	Hasta 300 pies (90 m)
	Cobertura en exteriores	Hasta 1 milla (1600 m)
	Potencia de salida	63 mW (+18dBm)
	RF, velocidad de datos	250 kbps
	Sensibilidad del receptor	-102 dBm
Requerimiento de potencia	Suministro de voltaje	2.7 a 3.6 V DC
	Transmisión de corriente	205 mA a 3.3 V
	Recepción de corriente	47 mA a 3.3 V
	Intensidad de reposo	3.5 uA a 25 °C
Información general	Banda de frecuencia	2.4 GHz ISM
	Método de configuración	AT y API, local o por aire
	Tipo de antena	Conector RP-SMA
Trabajo en red	Topología de red	Punto a punto, punto-multipunto y mesh.
	Capacidad de canales	15 canales de secuencia directa (11-25)
	Direccionamiento	Pan ID, 64 bit IEEE MAC

Tabla 9. Especificaciones técnicas de la unidad de transmisión, Xbee Pro S2B (41).

La configuración de esta unidad debe ser realizada cuidadosamente pues de esto depende que el consumo de energía sea mínimo. A continuación, se describe paso a paso la configuración en la cual el módulo consumirá únicamente la energía necesaria.

- Se inserta el módulo XBee Pro S2B en la tarjeta *XBee Explorer* USB.
- Se abre una ventana del terminal X-CTU.
- Se realiza la búsqueda de los dispositivos conectados, esto es presionando simultáneamente las teclas ctrl+shift+D o dando clic sobre el botón de búsqueda en el terminal y se selecciona el puerto con el que el módulo se encuentra conectado.
- Una vez encontrado el módulo Xbee conectado, se configura los valores de *Baud Rate: 9600, Flow Control: none, Data Bits: 8, Parity: none; Stop Bits: 1*.
- Se presiona doble clic sobre el módulo ya encontrado.
- Se hace clic sobre el botón read del terminal X-CTU.
- En el botón *update*, se configura el XBee con el firmware de *Zigbee Router AT*.
- En la opción *Networking*, se configura el Pan ID para el dispositivo considerando que este ID debe ser el mismo en todos los nodos de la red.
- El dispositivo coordinador por defecto asignará al dispositivo final el canal de operación que escogió.
- En la opción *Addressing*, se configura la dirección del módulo coordinador, esto en el parámetro *Destination Address*.
- Se configura el parámetro *Node Identifier* donde se colocará el nombre del nodo.
- A continuación, se debe configurar el modo de operación de módulo que en este caso será el modo cycle sleep (7), esto en la pestaña Sleep Modes, así mismo se configura el tiempo que el módulo permanecerá en estado de reposo y el tiempo de envío de datos.

- Una vez terminada la configuración se da clic en el botón write del terminal.

A continuación, en la tabla 10 se exponen los parámetros a ser configurados en cada uno de los nodos sensores y la figura 37 muestra una perspectiva del terminal de configuración, X-CTU.

INDICADOR	NOMBRE	VALOR
NI	Identificar del nodo	N-ROUTER1
ID	Pan ID	33
SD	Duración de escaneo	3
DH	Dirección destino en alto	13A200 (DIR. EN ALTO DEL COORDINADOR)
DL	Dirección destino en bajo	409F2A79 (DIR. EN BAJO DEL COORDINADOR)
SH	Dirección origen en alto	13A200
SL	Dirección origen bajo	40F5053D
SP	Periodo de reposo	3E8 (10seg)
SN	Número de periodos	3C (5seg)

Tabla 10. Configuraciones del nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

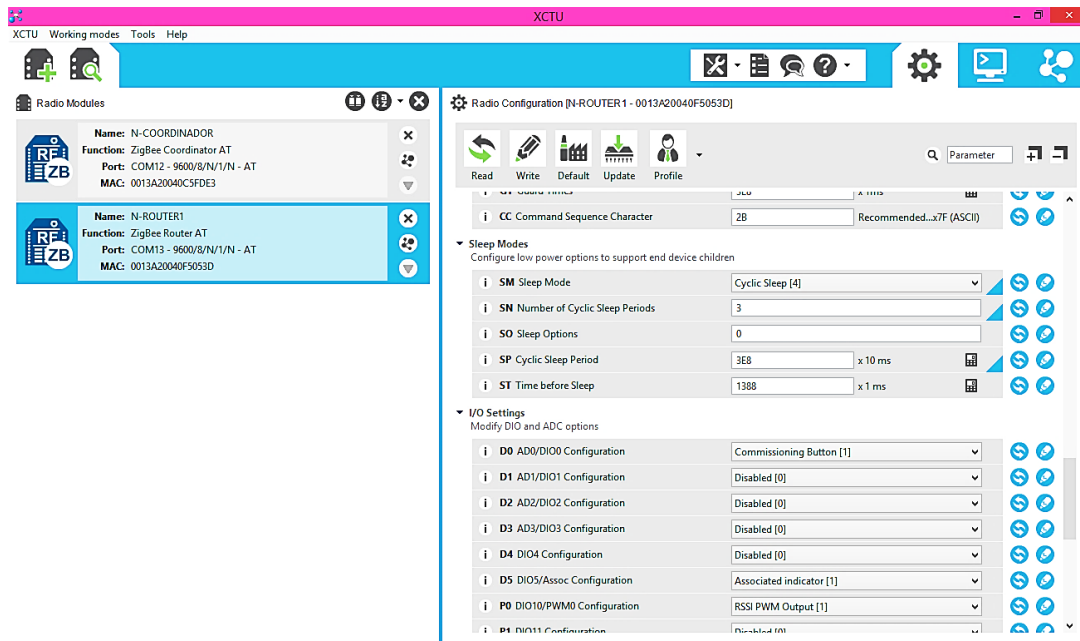


Figura 37. Pantalla de configuración del nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

⚡ **Unidad de potencia:** Considerada como una de las principales unidades dentro de un nodo sensor, pues esta estará encargada de suministrar energía a todas de unidades que componen al nodo sensor. Considerando que de esta unidad dependerá el correcto funcionamiento del resto de unidades, se deberá tomar las siguientes consideraciones.

- Tensión que suministra la batería, debe ser la suficiente como para garantizar el correcto funcionamiento de la WSN, y dependerá principalmente de la unidad de procesamiento a utilizar, en este caso la unidad de procesamiento será una placa ARDUINO UNO. Esta tensión se deberá encontrar en el rango de 6 a 20 V.
- Capacidad de la batería, un parámetro muy importante puesto que de este dependerá el tiempo de duración de la WSN. Se mide en mAh.

El consumo de corriente por el nodo, aproximadamente es de 50mA mientras que el consumo de voltaje es de 3.3 y 5 V, en base a las características de cada unidad a utilizar, por lo que se calcula que la potencia a consumir es de 0.25 W.

Tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas se decide utilizar una batería de 12 V con capacidad de 1.3 Ah con una potencia de 15.6W, la misma que provee energía al nodo durante aproximadamente 2 días y medio brindando de esta manera el tiempo necesario para recargarlas o reemplazarlas, este se obtiene de dividir la potencia que provee la batería para la potencia que consume el nodo, las características de esta unidad se detallan a continuación en la tabla 11.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Batería tipo gel	Recargable
Capacidad	1.3 A/h
Voltaje	12 V
Marca	FirstPower
Largo	97 mm
Ancho	43 mm
Altura	52 mm
Tipo de conector	FO-01

Tabla 11. Característica de la unidad de potencia.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 38, se detalla la conexión básica entre la unidad de procesamiento y la unidad de transmisión, mientras que en la figura 39 se presenta finalmente, el esquema de conexión del nodo sensor el cual dependiendo de la función a desempeñar estará compuesto por uno de los sensores mencionados anteriormente, como se puede apreciar en dicha figura, todas las unidades deben ir conectadas a la unidad de procesamiento, por lo que esta juega un rol importante en el diseño del nodo.

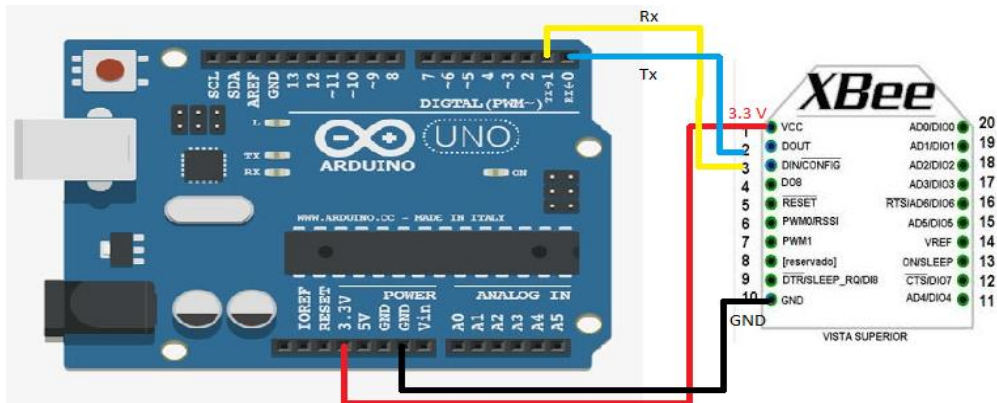


Figura 38. Esquema de conexión básica entre arduino y xbee.

Fuente: <https://pgcarduino.blogspot.com/2015/04/configurar-hc-05.html>.



Figura 39. Conexión final del nodo sensor.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.2 Nodo Coordinador

El nodo coordinador se encuentra formado por 3 unidades principales, las mismas que se muestran en la figura 40.



Figura 40. Componentes de un nodo coordinador.

Fuente: Elaboración propia.

✎ **Unidad de recepción:** Al igual que la unidad de transmisión, la unidad de recepción es de gran importancia pues se encargará especialmente de la comunicación con los nodos sensores para la correcta recolección de datos. El módulo seleccionado para realizar esta función es el mismo utilizado en los nodos sensores, el módulo Xbee Pro S2B, cuya configuración es similar a la del nodo sensor con la pequeña variación en la dirección de destino, pues al ser el nodo coordinador su destino serán todos los nodos sensores en la red es por ello que, las direcciones de destino van desde el valor 0 al valor FFFF en hexadecimal, estas configuraciones se muestran en la tabla 12. Cabe destacar que se seleccionó este módulo debido a que al ser el mismo del nodo sensor es totalmente compatible, pues como se había mencionado las serie 1 y 2 no son compatibles entre sí.

INDICADOR	NOMBRE	VALOR
NI	Identificar del nodo	N-COORDINADOR
ID	Pan ID	33
SD	Duración de escaneo	3
DH	Dirección destino en alto	0
DL	Dirección destino en bajo	FFFF
SH	Dirección origen en alto	13A200
SL	Dirección origen bajo	409F2A79
AP	Modo API	1

Tabla 12. Configuraciones del nodo coordinador.

Fuente: Elaboración propia.

✎ **Unidad de acondicionamiento:** Esta unidad es similar a la unidad de acondicionamiento de nodos sensores cuya finalidad radica en acoplar los niveles de voltaje del ordenador con el cual se realizará el monitoreo a los del módulo Xbee, el módulo encargado de realizar esta función es el módulo USB Explorer, el cual se muestra en la figura 41.



Figura 41. Componentes de un nodo coordinador.

Fuente: Elaboración propia.

- ✎ **Unidad de potencia:** Esta unidad cumplirá la función de proporcionar el nivel de voltaje necesario para el correcto funcionamiento del resto de unidad. El encargado de realizar esta función será el ordenador utilizado para la recolección e interpretación final de los datos, es decir utilizado para el monitoreo.

En la figura 42 se presenta finalmente, el esquema de conexión final del nodo coordinador.

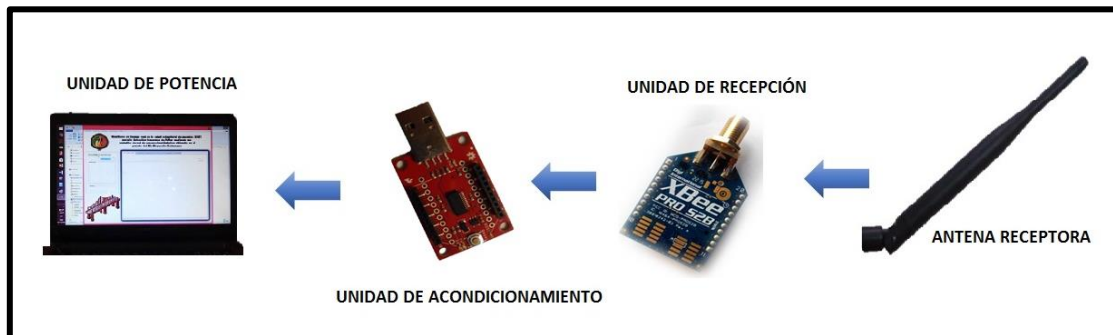


Figura 42. Esquema de conexión del nodo coordinador.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Software

El software considerado dentro del prototipo se puede exhibir en 3 categorías tales como:

- ✎ **Software de recolección de datos:** Este software se refiere a la plataforma que permitirá la recolección de la información obtenida a través de la unidad de sensado, este es de gran ayuda en el nodo sensor. El software utilizado debe ser

compatible con la plataforma utilizada para procesamiento dentro del nodo sensor, por lo que este será el software propio de Arduino.

✎ **Software de configuración:** Este será de gran utilidad tanto para el nodo sensor como para el nodo coordinador puesto que permitirá la configuración de los módulos utilizados en la unidad de transmisión y recepción. El software utilizado debe estar en la potestad de leer correctamente los módulos Xbee, por lo que el software seleccionado es el X-CTU.

✎ **Software de monitoreo:** Finalmente el software utilizado para realizar el monitoreo debe ser amigable al usuario, por lo que el software seleccionado para la realización de la interfaz de monitoreo es Visual Basic 2015, el cual permite la realización y venta de aplicaciones.

5.4.2.1 Desarrollo de la interfaz de monitoreo

Una vez descritas las diferentes unidades de los nodos sensores y coordinador es preciso describir la interpretación final de los datos enviados. Una vez que el nodo sensor ha recolectado y procesado la información esta se envía hacia el nodo coordinador, el cual se encontrará conectado al ordenador de monitoreo, en dicho ordenador se debe encontrar la interfaz que permita la lectura correcta de la información receptada. Esta lectura se realiza de la siguiente manera:

✎ Primero se establece la conexión entre el módulo Xbee Explorer USB y la interfaz de monitoreo, esto durante la implantación de la interfaz en el software VS Express 2015 se logra a través de la herramienta denominada SerialPort la cual se muestra en la figura 43, la misma que permitirá abrir el puerto en el cual se encuentra conectado el módulo Xbee Explorer y poder leer los datos que la unidad de recepción se encuentra receptando.

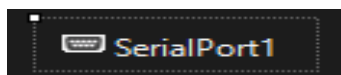


Figura 43. Herramienta de control de puerto serial en VS Express 2015.

Fuente: Elaboración propia.

La apertura del puerto se realiza a través de las líneas de código que se muestran en la figura 44.

```
SerialPort1.PortName = puerto.Text 'asignamos al puerto serial el COM seleccionado en el menú desplegable  
SerialPort1.Open() 'Se abre el puerto seleccionado en el menú desplegable'
```

Figura 44. Código para la apertura del puerto serial.

Fuente: Elaboración propia.

- Una vez abierto el puerto de comunicación serial en el cual se encuentra conectado el nodo coordinador se procede a la lectura de la información receptada, esto se realiza a través de las líneas de código que se presentan en la figura 45 en la cual se realiza la lectura de 4 bytes de datos recibidos, tomando en cuenta que la unidad de procesamiento en el nodo sensor realiza el envío de 4 bytes de información, en la cual 2 de ellos son delimitadores de inicio/fin a la vez que permiten conocer el nodo de origen de la información y 2 son la información obtenida.

```
caracter = SerialPort1.ReadByte()  
If caracter = 105 Then  
    For i As Integer = 1 To 2  
        datos = SerialPort1.ReadByte()  
        If i = 1 Then  
            nhumedad = datos  
        ElseIf i = 2 Then  
            humedad = datos  
        End If  
    Next  
    caracter = SerialPort1.ReadByte()  
    n4 = 1  
    r4 = 1  
    r2 = 0  
    r3 = 0  
    r1 = 0  
    r5 = 0  
    If caracter = 111 Then  
        humed.Series("°C").Points.AddXY(DateTime.Now.ToString, nhumedad.ToString) 'Indicamos que puntos van a ser los de la gráfica  
        humed.Series("RH").Points.AddXY(DateTime.Now.ToString, humedad.ToString) 'Indicamos que puntos van a ser los de la gráfica
```

Figura 45. Código para la lectura de la información que recepta la unidad de recepción.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que el byte delimitador de fin ha llegado se procede a graficar los datos a través de las 2 últimas líneas de código presentadas en la figura 45. Se debe recalcar que estas líneas de código se repetirán para los 5 nodos sensores, variando únicamente la comparación en los delimitadores de inicio/fin, como, por ejemplo, en la figura 45 se realiza la comparación con los delimitadores 105 y 111 que equivalen a una letra del abecedario (i, o).

5.4.2.2 Descripción de la interfaz de monitoreo

En la figura 46 se muestra la pantalla principal de la interfaz de monitoreo desarrollada con el software VS Express 2015, la cual se encuentra formada por las siguientes secciones:

- ✦ **Archivo:** Esta sección se encuentra formada por diferentes apartados como:
 - **Monitoreo:** El cual permite al usuario dirigirse hacia las gráficas de la información obtenida a través de la unidad de sensado.
 - **Abrir:** Esta opción permite importar los registros de información de SE del puente almacenados en el ordenador.
 - **Base de datos:** Permite la visualización de un registro de la información que se encuentra obteniendo la unidad de recepción como se muestra en la figura 47.
 - **Iniciar sesión:** Esta opción permitirá al usuario iniciar su cuenta y habilitar las opciones de guardar y crear nuevos usuarios, al realizar clic en este apartado se abrirá la pantalla que se muestra en la figura 48. Destacando que para la validación de los datos de usuarios se hizo uso de una base de datos desarrollada en Microsoft Access 2016, en la cual se especifican los campos de: nombre de usuario y contraseña.
- ✦ **Guardar:** Permitirá al usuario que haya iniciado sesión guardar la información receptada por la unidad de recepción.
- ✦ **Usuario:** Está formada por 2 secciones: Agregar usuario (esto es, agregar a una base de datos) y cerrar sesión.
- ✦ **Desconectar:** Permite cerrar el puerto de comunicación entre la interfaz y el nodo coordinador.
- ✦ **Salir**

Además de las secciones anteriormente mencionadas se debe destacar la sección de interpretación de información, la misma que se ubica en la parte izquierda de la interfaz y la cual muestra de forma rápida un análisis de la condición instantánea del puente, así como la información receptada.



Figura 46. Pantalla principal de la interfaz de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.



Monitoreo en tiempo real de la salud estructural de puentes (MSE) para la detección temprana de fallas mediante un prototipo de red de sensores inalámbricos ubicados en el puente del Río Boquerón-Catamayo

SELECCIONE EL PUERTO COM:

MENSAJE

El puente se encuentra estable en la parte inferior

DATOS

X: 90.00 Y: 90.00




Estabilidad Parte central:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:09
Estabilidad Parte inferior:	Estabilidad en x: 90°	Estabilidad en y: 147°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:09
Humedad del puente: 0 RH,	Temperatura del puente: 0°C		Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:09
Vibración: 0,			31/10/2016 9:35:09
Estabilidad Parte superior:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:09
Estabilidad Parte central:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:09
Estabilidad Parte inferior:	Estabilidad en x: 90°	Estabilidad en y: 114°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:09
Humedad del puente: 0 RH,	Temperatura del puente: 0°C		Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:09
Vibración: 0,			31/10/2016 9:35:10
Estabilidad Parte superior:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:10
Estabilidad Parte central:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:10
Estabilidad Parte inferior:	Estabilidad en x: 90°	Estabilidad en y: 81°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:10
Humedad del puente: 0 RH,	Temperatura del puente: 0°C		Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:10
Vibración: 0,			31/10/2016 9:35:10
Estabilidad Parte superior:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Estabilidad Parte central:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Estabilidad Parte inferior:	Estabilidad en x: 90°	Estabilidad en y: 90°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Humedad del puente: 0 RH,	Temperatura del puente: 0°C		Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Vibración: 0,			31/10/2016 9:35:11
Estabilidad Parte superior:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Estabilidad Parte central:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Estabilidad Parte inferior:	Estabilidad en x: 90°	Estabilidad en y: 90°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Humedad del puente: 0 RH,	Temperatura del puente: 0°C		Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:11
Vibración: 0,			31/10/2016 9:35:12
Estabilidad Parte superior:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12
Estabilidad Parte central:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12
Estabilidad Parte inferior:	Estabilidad en x: 90°	Estabilidad en y: 90°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12
Humedad del puente: 0 RH,	Temperatura del puente: 0°C		Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12
Vibración: 0,			31/10/2016 9:35:12
Estabilidad Parte superior:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12
Estabilidad Parte central:	Estabilidad en x: 0°	Estabilidad en y: 0°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12
Estabilidad Parte inferior:	Estabilidad en x: 90°	Estabilidad en y: 90°	Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12
Humedad del puente: 0 RH,	Temperatura del puente: 0°C		Fecha y Hora de la Medición: 31/10/2016 9:35:12

Figura 47. Pantalla de registro de información de la interfaz de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

INICIAR SESIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
 Área de la energía, las industrias y los recursos
 naturales no renovables
Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

INICIAR SESIÓN

USUARIO:

CONTRASEÑA:

Mostrar contraseña

Figura 48. Pantalla de inicio de sesión de la interfaz de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 CÁLCULOS

5.5.1 Pérdidas en el enlace de comunicación (L_t)

Las pérdidas en el enlace de comunicación están compuestas por 2 parámetros que son: las pérdidas en el espacio libre o pérdidas básicas de propagación y las pérdidas debido a agrupación de árboles, estas pérdidas se calculan a través de la ecuación 3.

$$L_t: L_{lpf} + L_{ITU-R} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

L_{lpf} : Pérdidas en el espacio libre, y se calcula a través de la ecuación 4.

$$L_{lpf}: 92.44 + 20 \log f(\text{GHz}) + 20 \log d(\text{km}) \quad \text{Ecuación 4.}$$

L_{ITU-R} : Pérdidas por presencia de vegetación (agrupación de árboles), se calcula a través de la ecuación 5 y se aplica en distancias entre nodo sensor y nodo coordinador inferior a 400m.

$$L_{ITU-R}: 0.2 f(\text{MHz})^{0.3} d(\text{m})^{0.2} \quad \text{Ecuación 5.}$$

5.5.1.1 Cálculo de la pérdida en el espacio libre (L_{lpf})

Considerando las características del módulo encargado de la comunicación se encuentra dentro de sus especificaciones que la frecuencia en la que opera es de 2.4Ghz el cual será utilizado a una distancia de aproximadamente 100m, por lo que las pérdidas básicas de propagación son:

$$L_{lpf}: 92.44 + 20 \log f(2.4\text{GHz}) + 20 \log d(0.1\text{km})$$

$$L_{lpf}: 80.044 \text{ dB}$$

5.5.1.2 Cálculo de la pérdida debido a la presencia de vegetación (L_{ITU-R})

Este tipo de pérdida diseñado por la ITU-R es aplicable en la banda UHF (300Mhz-3GHz) únicamente en casos en los que la distancia del enlace es menor a 400m y donde existe una agrupación de árboles pequeños. El cálculo de esta pérdida se realiza a continuación.

$$L_{ITU-R}: 0.2(2400)^{0.3}(100)^{0.2}$$

$$L_{ITU-R}: 5.19 \text{ dB}$$

Finalmente, las pérdidas totales en el enlace de comunicación son:

$$L_t: L_{lpf} + L_{ITU-R} = 80.04 + 5.19 = 85.23 \text{ dB}$$

5.5.2 Potencia de recepción (Pdr)

La potencia de recepción es una pieza clave en el correcto funcionamiento de la WSN pues de este parámetro dependerá la recolección en tiempo real de la información, se calcula a través de la ecuación 6.

$$Pdr(dBm): P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_t \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde:

P_{tx} : Potencia de transmisión expresada de dBm.

G_{tx} : Ganancia de transmisión expresada de dBi.

G_{rx} : Ganancia de recepción expresada de dBi.

L_t : Pérdidas en el enlace.

Considerando las pérdidas calculadas y las características de los componentes de la red como ganancia de la antena, potencia de los dispositivos, los cuales se detallan a continuación, se puede calcular la potencia de recepción.

P_{tx} : 63 mW equivalente a 18 dBm

G_{tx} : 7dBi.

G_{rx} : 5 dBi.

L_t : 85.23 dB.

$$Pdr(dBm): P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_t = 18 + 7 + 5 - 85.23 = -55.23 \text{ dBm}$$

Al contrastar el valor calculado con la sensibilidad de los equipos utilizados en la WSN el cual es -100 dBm podemos verificar que estos en el área de trabajo funcionarán normalmente siempre y cuando su unidad de potencia se encuentre funcionando con total normalidad.

6. RESULTADOS

Esta se compone de 4 partes: resultado y análisis de la simulación de red, resultado y análisis de la potencia de recepción, pruebas de funcionamiento del prototipo y finalmente interpretación de la información obtenida a través de la red de sensores.

6.1 RESULTADO Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE RED

En la figura 49 literal a y b se presenta las topologías en estrella y árbol respectivamente consideradas para el desarrollo del prototipo de red de sensores, estas 2 topologías se simularon en base a las características técnicas de los equipos a utilizar. Cabe mencionar que únicamente se seleccionaron estas 2 topologías ya que son las que mayormente se utilizan en un área de trabajo pequeño, es decir una red de área local.

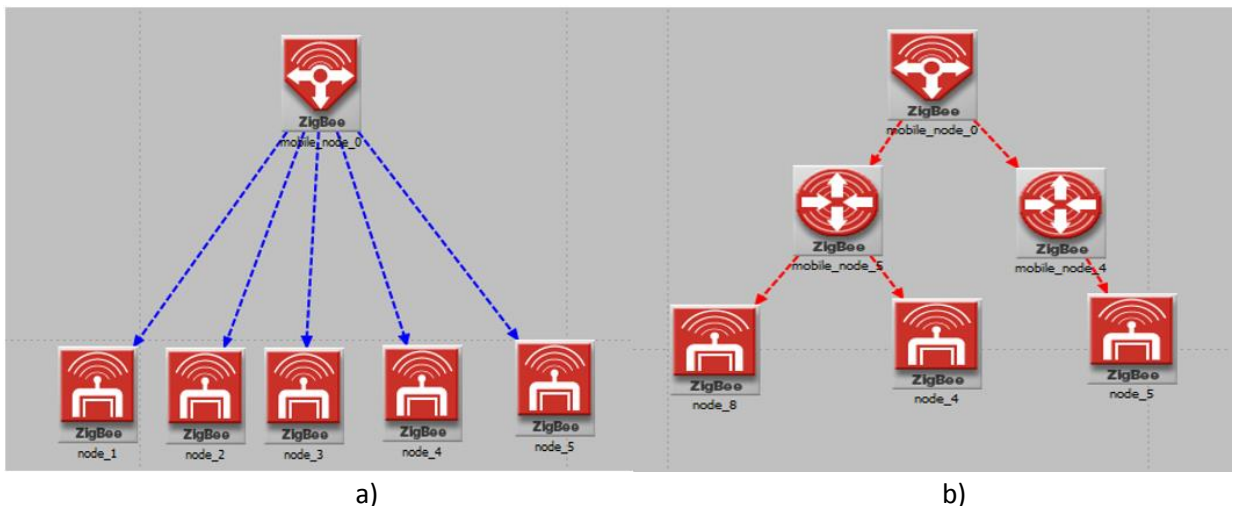
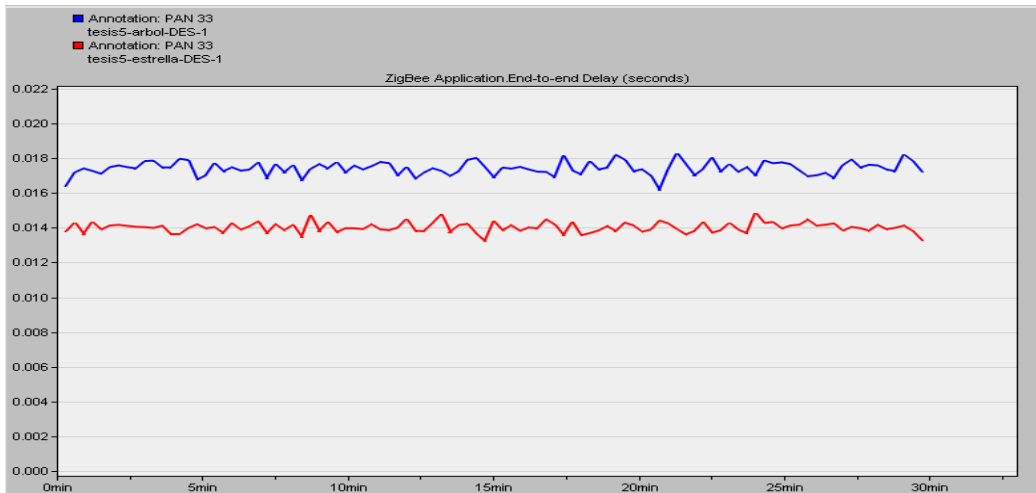


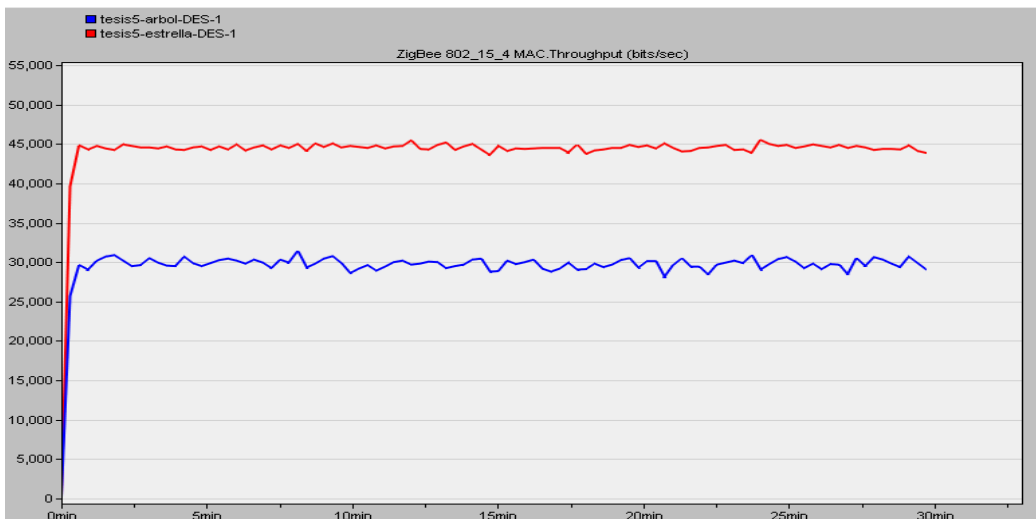
Figura 49. a) Topología en estrella, b) Topología en árbol.

Fuente: Elaboración propia.

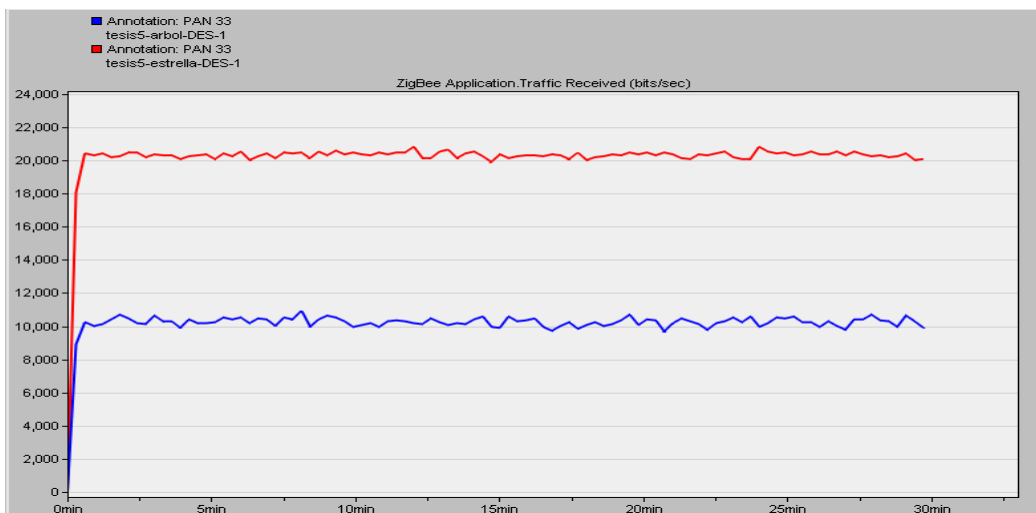
En la figura 50 literal a, b y c se muestra los resultados que arroja la simulación de estas 2 topologías en los cuales se analizan parámetros como: End to End Delay, Throughput y tráfico recibido, respectivamente.



a) Delay existente en las topologías en estrella (rojo) y árbol (azul).



b) Throughput o velocidad efectiva existente en las topologías simuladas.



c) Tráfico recibido en las topologías simuladas.

Figura 50. Curvas de valores obtenidas durante la simulación de las topologías en estrella y árbol.

Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETROS	T. ESTRELLA	T. ÁRBOL
End to End Delay (ms)	14	18
Throughput (kbps)	45	30
Tráfico recibido (kbps)	20	10

Tabla 13. Resultados de la simulación de la WSN.

Fuente: Elaboración propia.

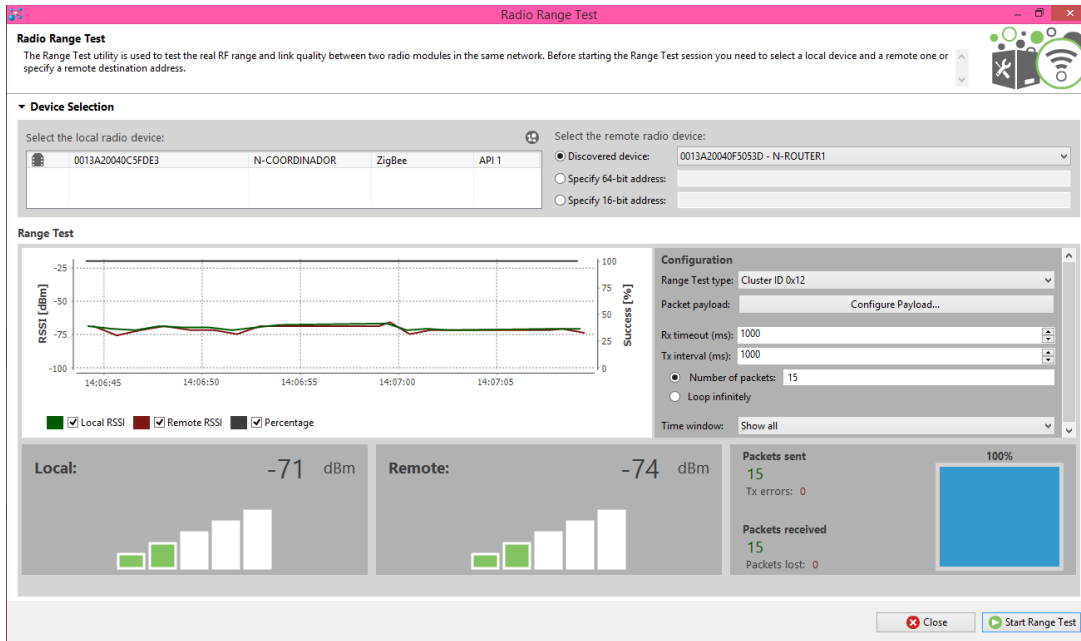
Como se puede observar en la figura 50 y más detalladamente en la tabla 13 la topología en estrella presenta mejores resultados en cuanto a los parámetros considerados como decisivos referente al óptimo funcionamiento de la red, parámetros tales como: retardo en el cual la topología en estrella presenta mayor rapidez con un valor de 14ms frente a 18ms, velocidad efectiva en la cual la topología en estrella lleva ventaja con 45 kbps frente a 30 kbps en topología en árbol y finalmente la cantidad de información recibida en la cual la topología en estrella permite la recepción de 20 kbps frente a 10 kbps de topología en árbol. Es por ello que en base a estos resultados se selecciona la topología en estrella como la topología a ser utilizada en el desarrollo del prototipo de WSN.

6.2 RESULTADO Y ANÁLISIS DE LA POTENCIA DE RECEPCIÓN

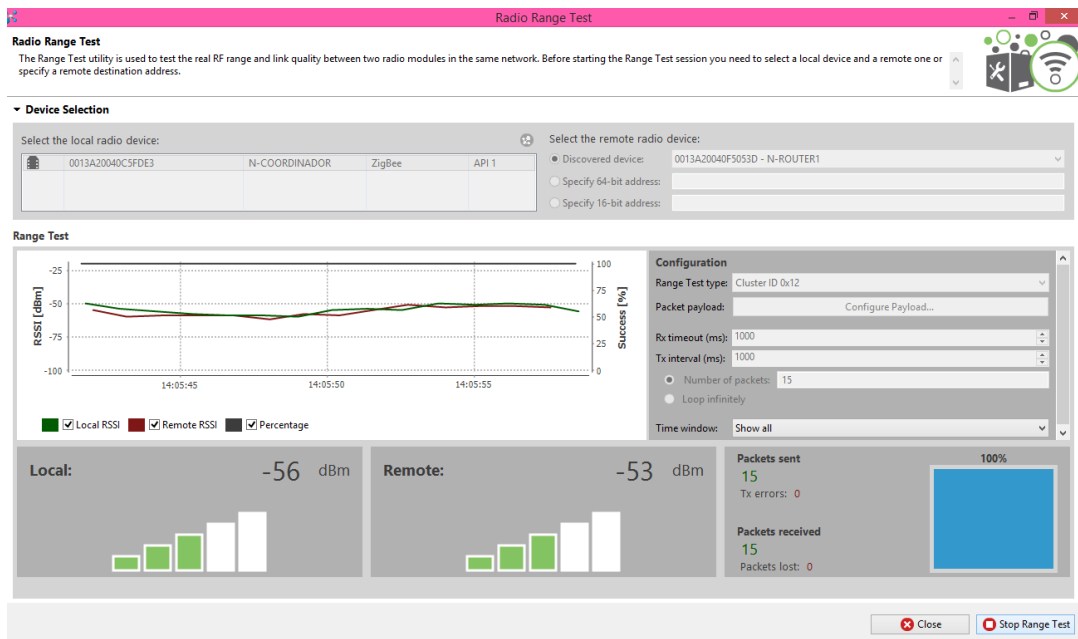
Para la medición de la potencia de recepción entre los módulos Xbee configurados como coordinador y router/sensor se realizaron pruebas a diferentes distancias con el fin de corroborar el correcto funcionamiento de la red a la distancia en la cual deberá funcionar el prototipo, estas distancias son: 50 m, 100 m y 150 m. Para esta medición se considerarán 2 parámetros: el RSSI (también llamado potencia de recepción) y la cantidad de paquetes recibidos, todo esto a través de la opción Range Test ubicada dentro de la opción herramientas en el software X-CTU. Esta configuración consiste en el envío de 15 paquetes de información de un dispositivo a otro donde este último reenvía el paquete a modo de respuesta con lo cual se comprueba la recepción del mismo.

Para realizar la medición se utilizó uno de los nodos sensores, el nodo coordinador y el pc portátil de monitoreo. Los resultados alcanzados durante la medición se muestran en las diferentes figuras a continuación.

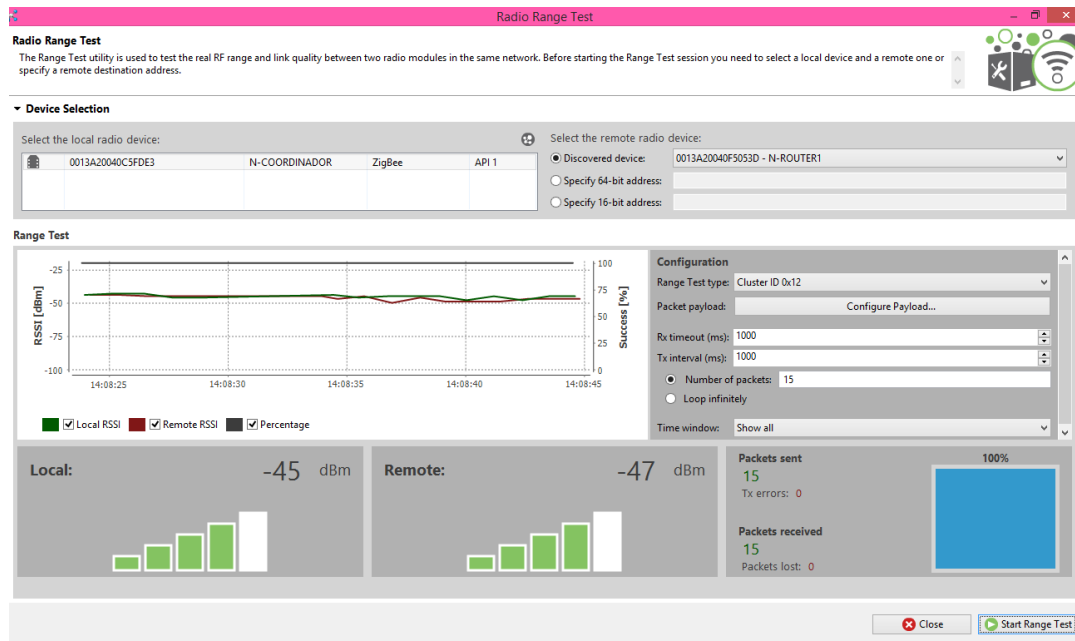
En la figura 51 literal a, b y c se puede observar el nivel de RSSI local y remoto, así como también el porcentaje de paquetes entregados correctamente a su destino para las distancias de 150m, 100m y 50m respectivamente.



a) Prueba de recepción a distancia de 150m



b) Prueba de recepción a distancia de 100m



c) Prueba de recepción a distancia de 50m

Figura 51. Pruebas de nivel de RSSI a diferentes distancias.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 52 se presenta la comparación entre el nivel de potencia de recepción a las distancias antes mencionadas, en la figura 53 se observa la comparación del porcentaje de recepción de paquetes enviados y porcentaje de confiabilidad del enlace a cierta distancia, cabe recalcar que el nivel de potencia de recepción a la distancia de 100m en la cual se va a trabajar es de -56 dBm que es aproximadamente igual a la potencia de recepción calculada de -55.23 dBm, el nivel de recepción de paquetes es del 100% por lo que la WSN opera sin ningún inconveniente a esta distancia con un nivel de confiabilidad aproximadamente de 68%.

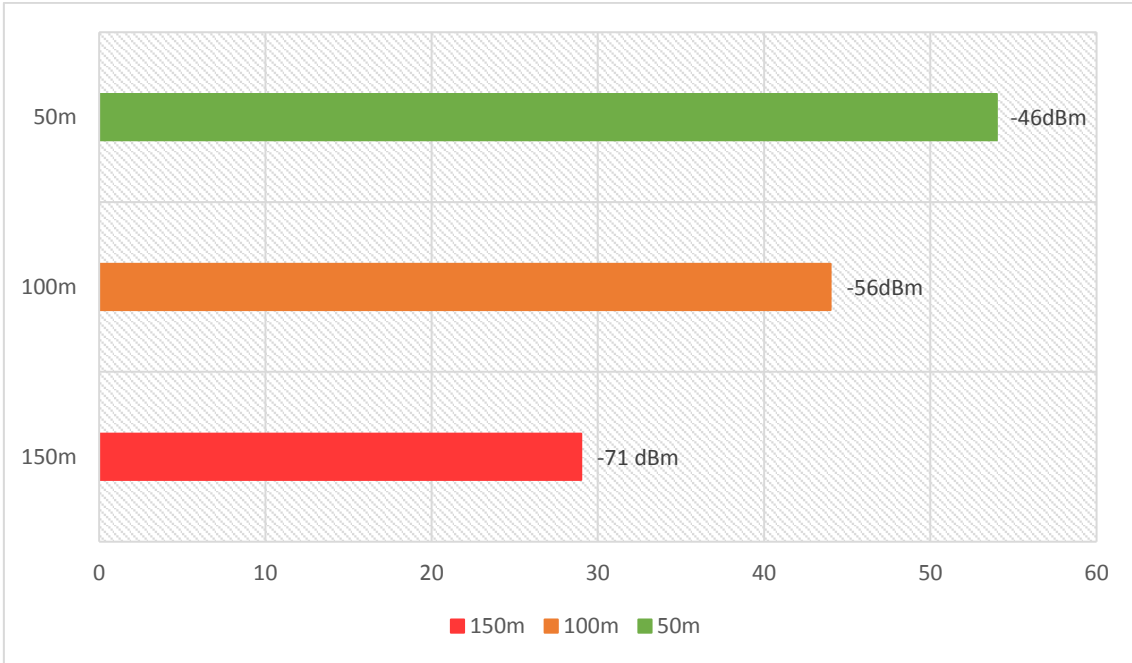


Figura 52. Comparación de niveles de potencia de recepción a distancias de 150m, 100m y 50m respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

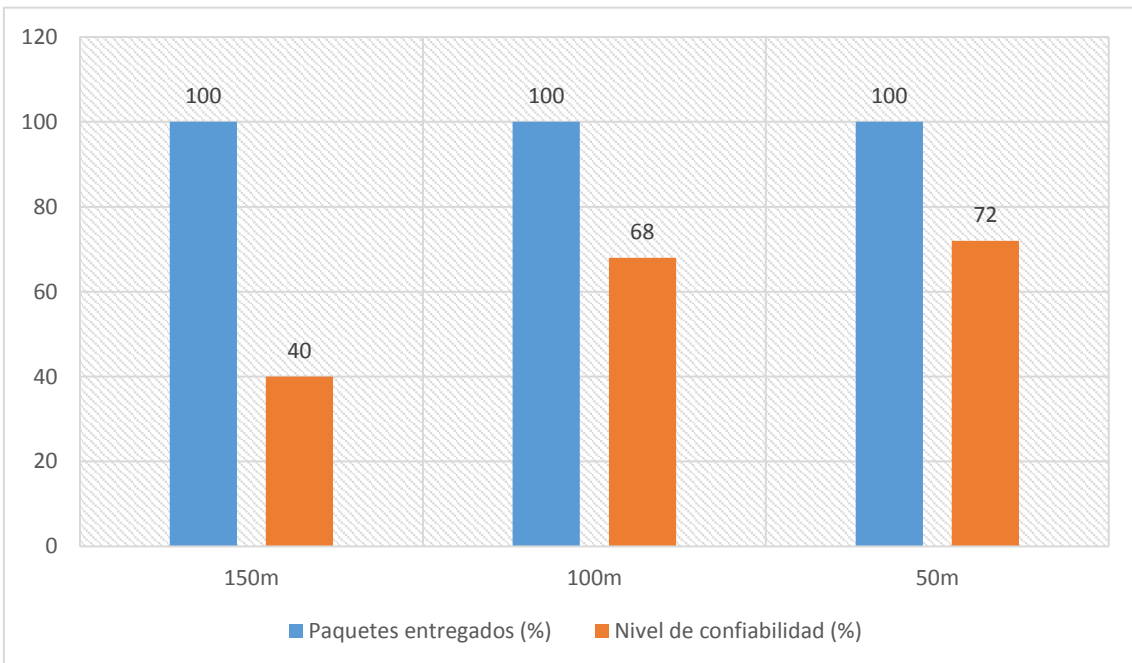


Figura 53. Comparación de porcentaje de entrega de paquetes y niveles de confiabilidad a distancias de 150m, 100m y 50m respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El funcionamiento del prototipo se evaluó en base a la implementación real de los nodos sensores sobre la estructura, por lo que finalmente para obtener suficiente información sobre la salud estructural de la misma, se precisa la utilización de: 3 nodos sensores de estabilidad, 1 nodo sensor de vibración y 1 nodo sensor de humedad, colocados sobre la estructura, en la acera. Cabe recalcar que este se puede ubicar en los accesos colocados en la parte lateral de puente.

Los nodos al estar expuestos a condiciones climáticas variables deben estar protegidos herméticamente, por lo que se diseñó una caja cerrada, de tal manera que haga que en condiciones lluviosas el agua se deslice sin penetrar en el nodo. La antena del módulo de comunicación inalámbrica se coloca en el exterior, con el objetivo de poder reemplazarla en el momento en que se precise un alcance mayor y evitar la atenuación de la señal. Este se muestra en la figura 54.

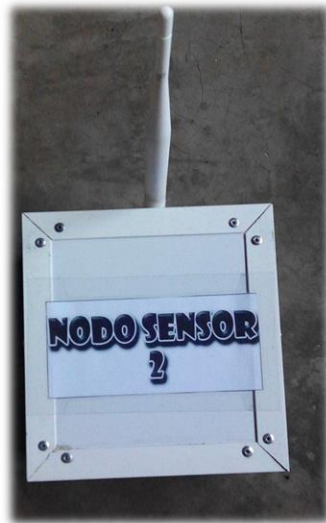
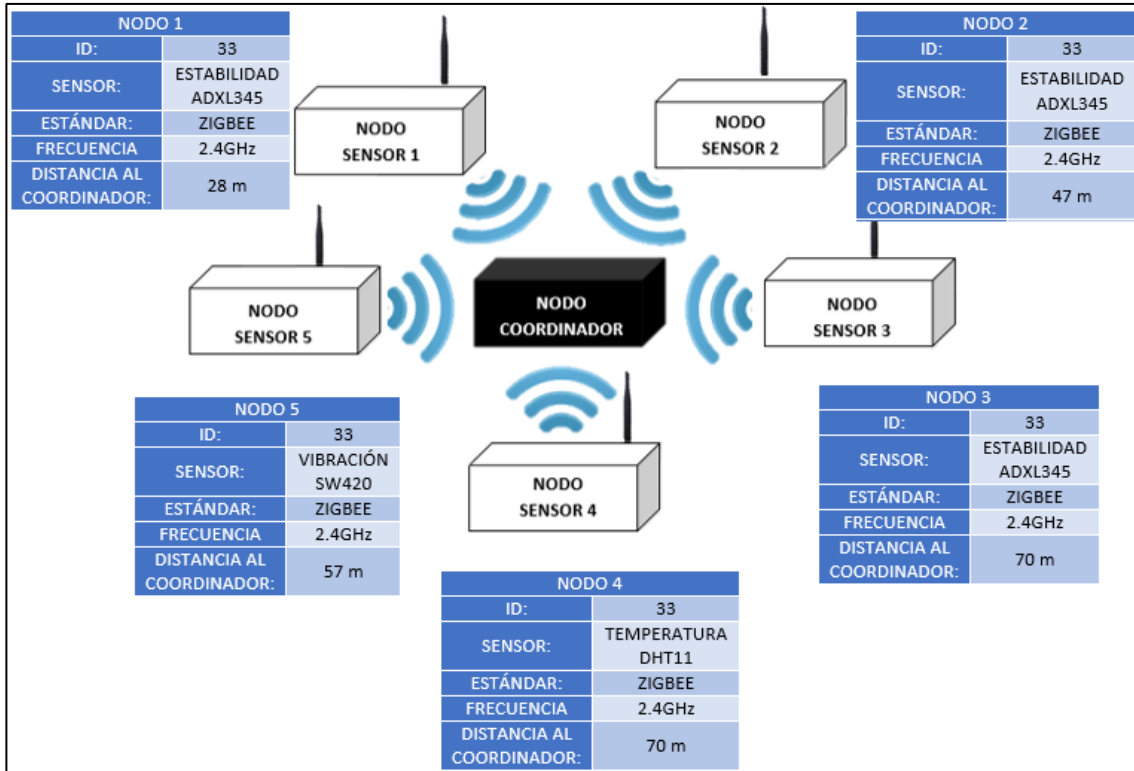


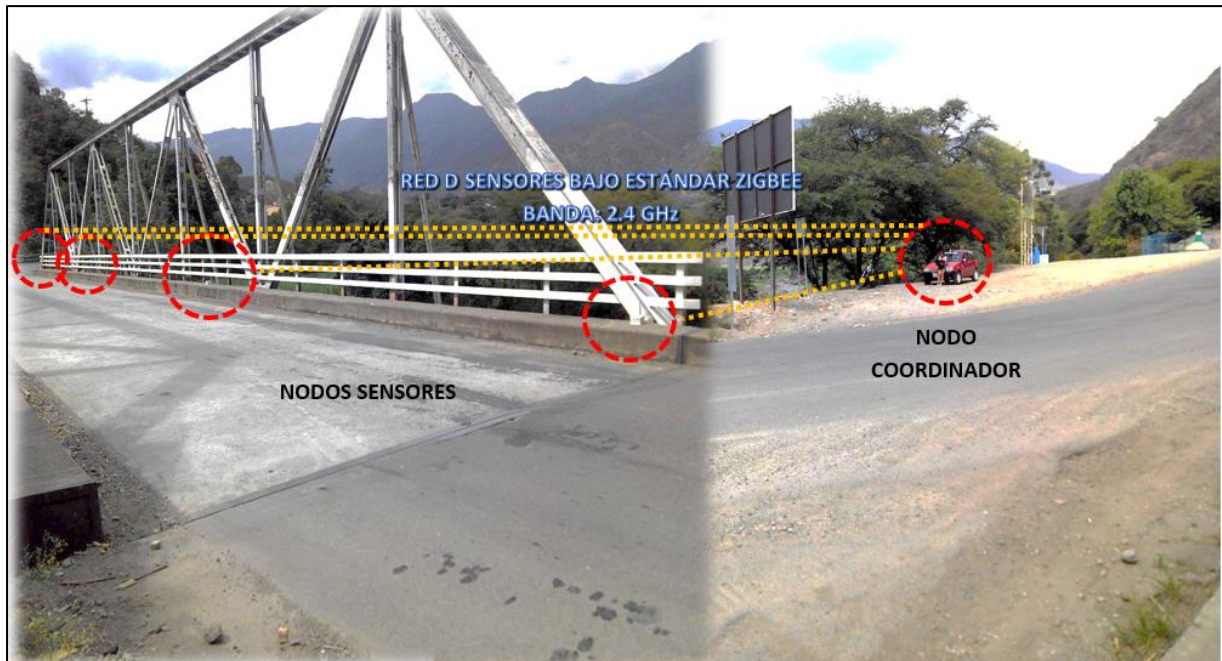
Figura 54.nodo sensor final.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados obtenidos durante la simulación de la red, se obtuvo que la topología lógica de la red es como se muestra en la figura 55 literal a, mientras que su topología física se muestra en la figura 55 literal b.



a)



b)

Figura 55. a) Topología lógica y características del prototipo de WSN, b) Implementación del prototipo de WSN sobre la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los nodos de estabilidad poseen la unidad de sensado dentro las mismas como se puede observar en el anexo II, mientras que en los nodos de vibración y humedad esta se encuentra colocada directamente sobre la estructura, fuera del nodo, debido a que de esta manera se obtendrá la información de forma más eficiente, como es el caso del sensor de vibración, el cual se ubica como se muestra en la figura 56. La ubicación del sensor de temperatura es bajo la estructura, cerca al estribo izquierdo, debido a que de esta manera se podrá obtener la humedad real que posee el puente, específicamente en el estribo que presenta socavación.



Figura 56. Ubicación del sensor de vibración sobre la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el lugar de monitoreo, que puede ser cualquier punto cercano al puente y que durante el desarrollo del presente trabajo se lo estableció específicamente cerca a la entrada del centro recreacional conocido como El Boquerón, el nodo coordinador se encuentra directamente conectado al pc de monitoreo en uno de los puertos de comunicación serial (puerto COM), en el momento en que se inicia el nodo coordinador

este establecerá la frecuencia en la cual operará la red enviando un paquete de broadcast a todos los dispositivos que posean el mismo identificador de red (ID=33), así mismo, se ejecuta la interfaz de monitoreo y se selecciona el puerto en el que se encuentra conectado el nodo coordinador, en mi caso, el puerto COM 12, como se muestra en la figura 57.

Todos los nodos se encontrarán transmitiendo simultáneamente cada 0.5 segundos, por lo que los módulos harán uso del mecanismo CSMA-CA con el fin de evitar colisiones y/o cuellos de botella en la red. En caso de que el nodo dejara de transmitir, el módulo ingresará al modo de bajo consumo en el que entrará a un estado de dormido durante 10 segundos y despertará para buscar nuevamente la red durante 5 segundos.

Luego de establecer la comunicación con el nodo coordinador, la interfaz en su pantalla principal presentará las curvas de valores correspondientes a cada nodo sensor conjuntamente con el análisis de los datos obtenidos en tiempo real verificando de esta manera el buen funcionamiento de la red, en la figura 58 se muestran las curvas de valores obtenidas durante la prueba de implementación.

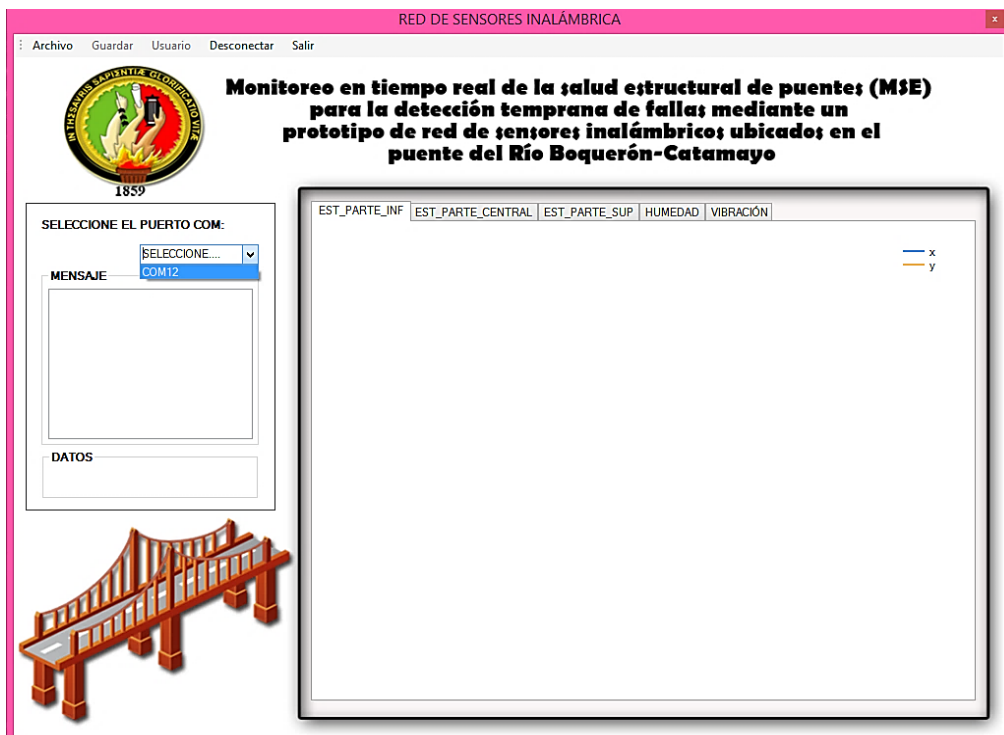
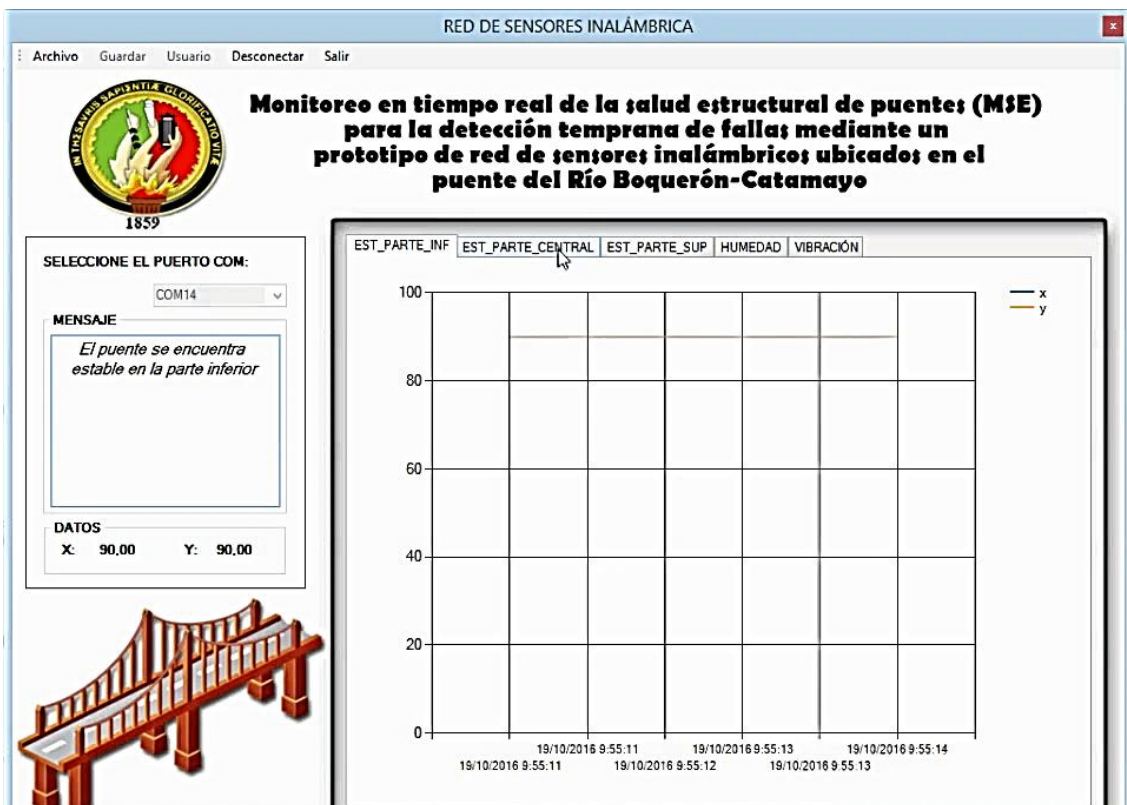


Figura 57. Selección del puerto de comunicación en la interfaz de monitoreo.

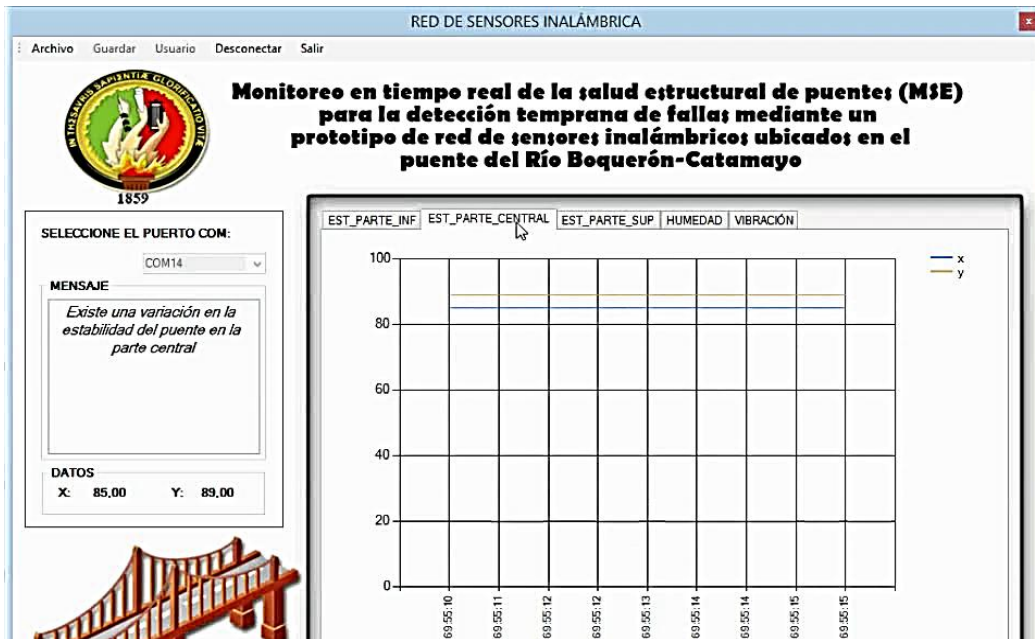
Fuente: Elaboración propia.

Como se mostró en la figura 47, la información obtenida a través de la interfaz de monitoreo se presenta en forma de archivo de texto, el cual presenta la información luego de haber inicializado la base de datos a través del botón “Base de datos” ubicado en la sección archivo. Esta información puede ser almacenada en el ordenador únicamente por un usuario registrado, es decir, que haya iniciado sesión.

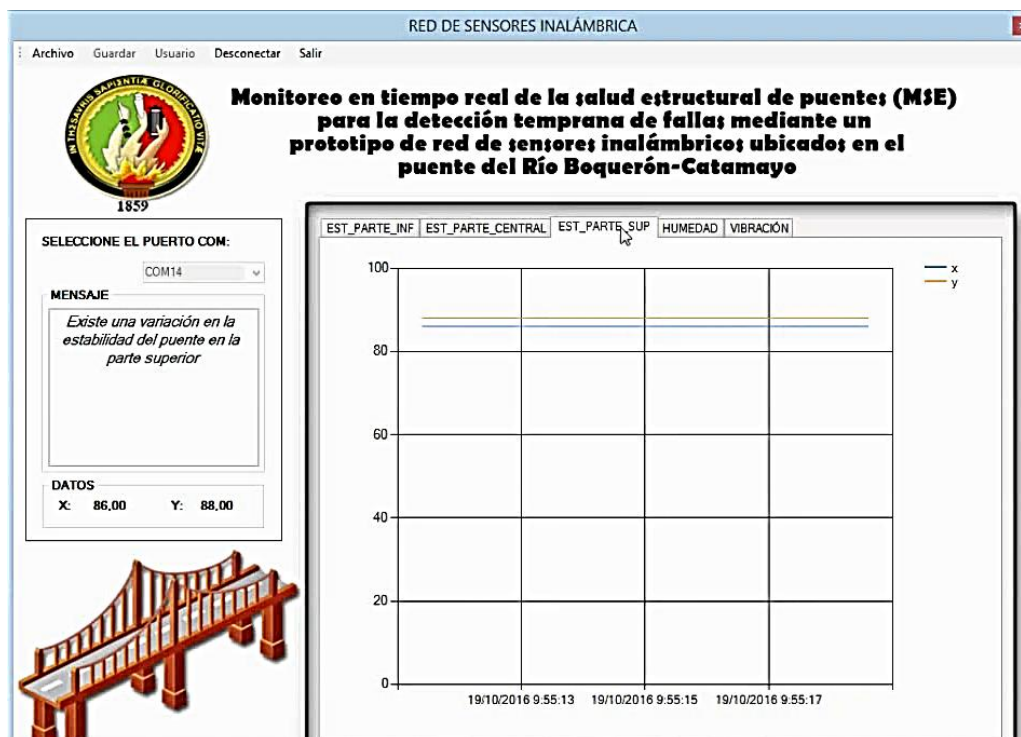
Finalmente, luego de haber realizado el monitoreo de la estructura, se retiran los nodos sensores de su ubicación ya que no existe un sistema de vigilancia en este lugar.



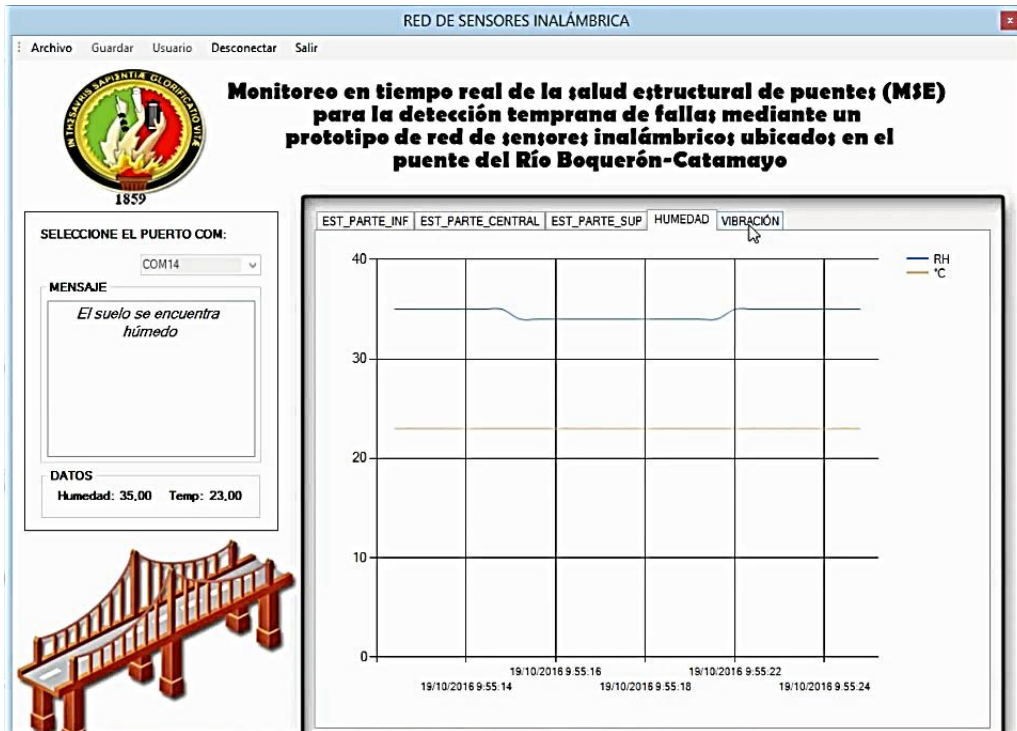
a) Datos de estabilidad correspondientes al estribo derecho aguas abajo.



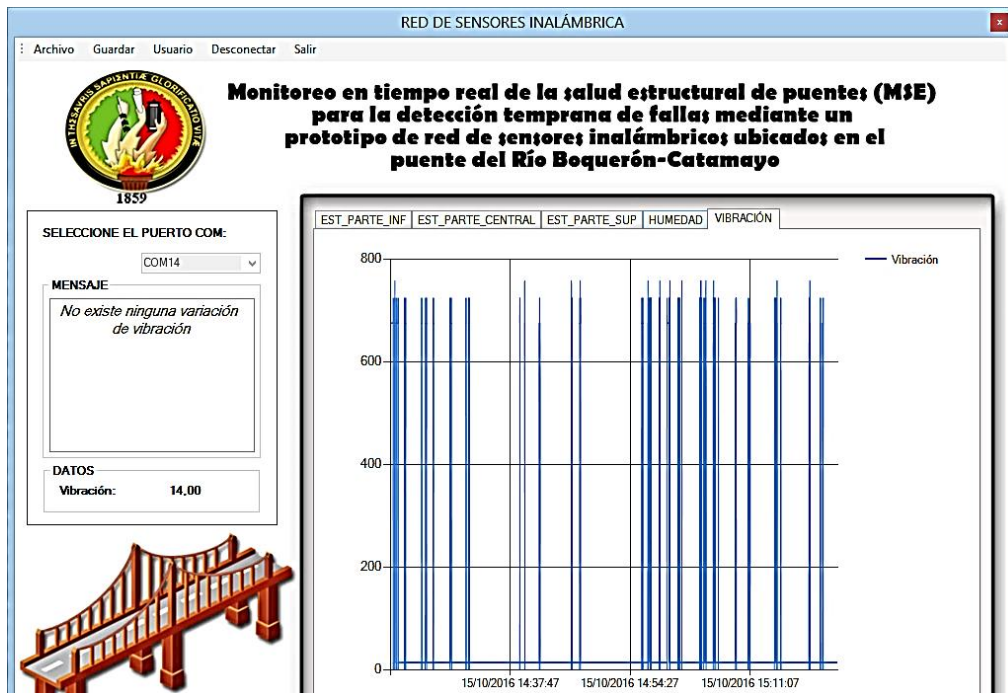
b) Datos de estabilidad correspondientes a la parte central.



c) Datos de estabilidad correspondientes al estribo izquierdo aguas abajo.



d) Datos de humedad y temperatura.



e) Datos de vibración.

Figura 58. Datos obtenidos durante el monitoreo en tiempo real de la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

6.4 INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

El monitoreo de la estructura se realizó durante 7 días 1 hora/día, en horarios diferentes como se muestra en la tabla 14, a fin de obtener y almacenar información que permita determinar su salud estructural.

FECHA	HORA
MIÉRCOLES 12 de Octubre de 2016	9:00 am – 10:12 am
JUEVES 13 de Octubre de 2016	18:00 pm – 19:00 pm
VIERNES 14 de Octubre de 2016	11:43 am – 12:45 pm
SÁBADO 15 de Octubre de 2016	14:21 pm – 15:30 pm
DOMINGO 16 de Octubre de 2016	15:25 pm – 16:30 pm
LUNES 17 de Octubre de 2016	16:30 pm – 17:30 pm
MARTES 18 de Octubre de 2016	17:30 pm – 18:30 pm

Tabla 14. Horario de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, mediante gráficas estadísticas se expone un compendio de la información obtenida tras haber realizado el monitoreo de la salud estructural del puente del río Boquerón-Catamayo, durante el cual, en base a un estudio de tráfico vehicular realizado, se destacan las horas pico: 9:00 am, 12:00 am y 5:00 pm, durante esta evaluación de tráfico se obtuvo un promedio de 128 vehículos por hora, a continuación, en la tabla 15 se detalla el porcentaje de vehículos según su clasificación durante las horas pico. Además, se presenta la interpretación de la información, realizada por el especialista en estructuras e interesado en conocer la salud estructural del puente, el Ing. José Eduardo Cango profesional en ingeniería civil y colaborador en la determinación de variables a monitorear.

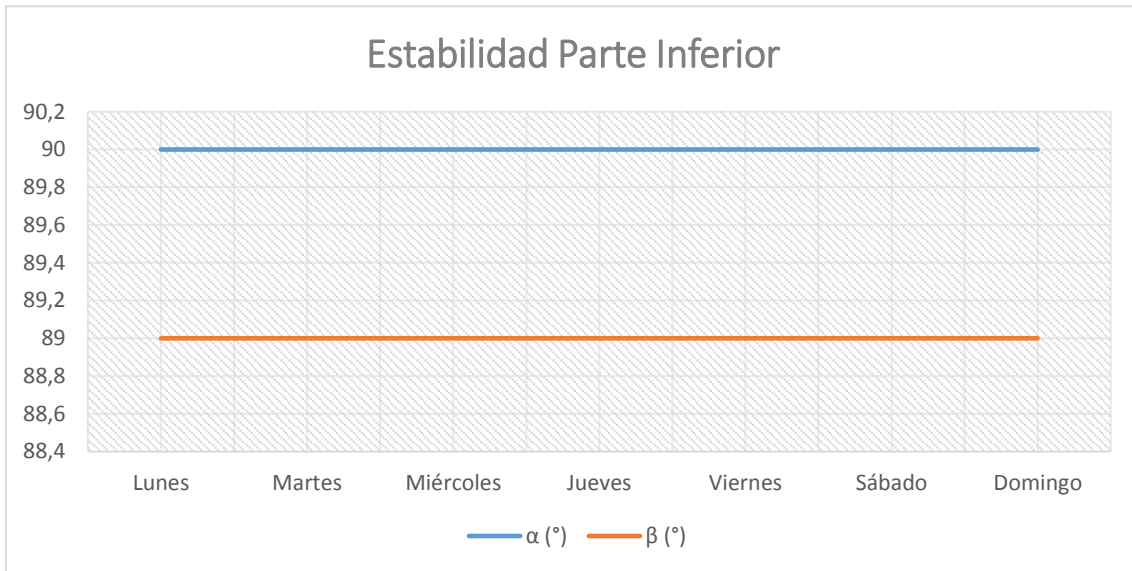
TIPOS DE VEHÍCULOS	PORCENTAJE DE VEHÍCULOS (%)	CANTIDAD DE VEHÍCULOS
Livianos	35 %	45
2 ejes	50 %	64
3 ejes	15 %	19

Tabla 15. Promedio de tráfico que circula sobre la estructura.

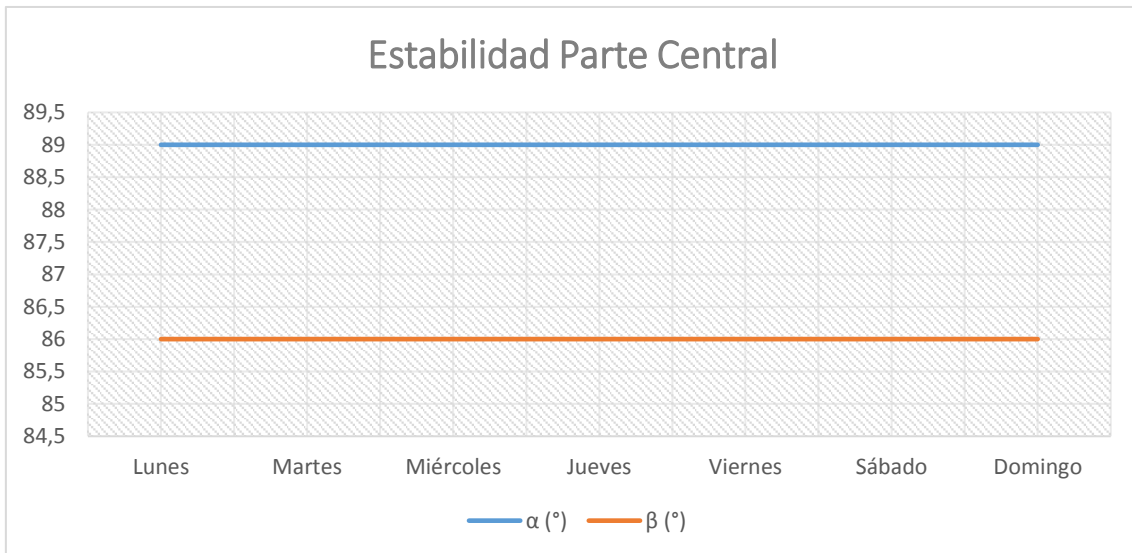
Fuente: Elaboración propia.

6.4.1 Estabilidad

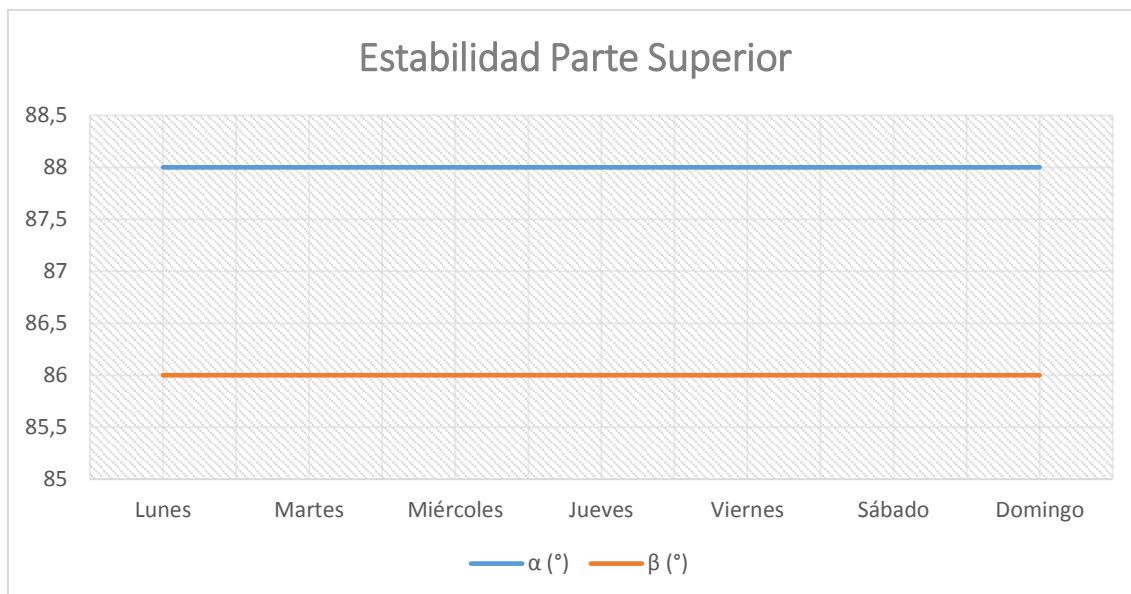
En la figura 59 se presentan los ángulos de estabilidad α y β correspondientes a los ejes x e y respectivamente, obtenidos durante el proceso de monitoreo al utilizar un acelerómetro en el cual se cuantificó la aceleración, estableciendo un valor de 90° cuando el sensor se encuentra estable, esto tanto para el estribo izquierdo aguas abajo, estribo derecho aguas abajo y parte central, en ejes de inclinación horizontal y vertical.



a) Ángulo de estabilidad en el estribo inferior (derecho).



b) Ángulo de estabilidad en la parte central.



c) Ángulo de estabilidad en el estribo superior (izquierdo).

Figura 59. Ángulos de estabilidad obtenido por los 3 nodos sensores.

Fuente: Elaboración propia.

Como se mostró en la figura 59, la variación de estabilidad se ha dado mayoritariamente en el estribo izquierdo aguas abajo (estabilidad en la parte superior), este valor idealmente es 90° para los 2 ángulos, respecto a esta información el especialista manifiesta que la información obtenida muestra que la estructura presenta una pequeña inclinación especialmente en el estribo izquierdo, sin embargo, la condición en que se encuentra el puente es aun estable ya que el ángulo de inclinación de la misma en ambos ejes encuentra entre los rangos normales de estabilidad definidos anteriormente en la tabla 4, esta inclinación es debido a que ya se ha evidenciado socavación en dicho estribo por lo que la estabilidad del puente necesariamente se vio afectada.

6.4.2 Vibración

En la figura 60, se muestra un promedio de los tiempos de vibración durante las horas pico, estos fueron medidos durante el paso de vehículos sobre la estructura y que se vio más acentuado en el estribo con presencia de socavación.

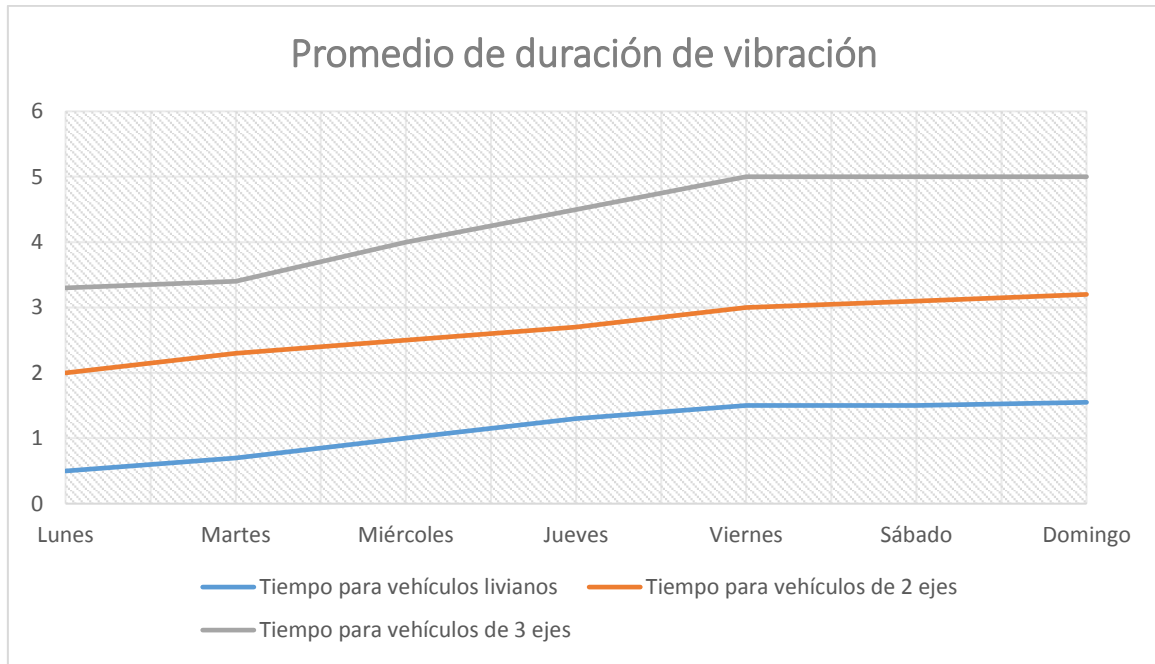


Figura 60. Tiempos promedio de duración de vibración en la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

Referente a la información vista en la figura 60, en la que se presenta un promedio de los tiempos durante los cuales se detecta la presencia de movimientos oscilatorios momentáneos que idealmente son: 100ms a 1s para vehículos livianos, 1s a 3s para vehículos de 2 ejes y 3s a 5s para vehículos de 3 ejes , se observa que los tiempos obtenidos son comunes de acuerdo al tipo de vehículo que circule por la estructura y más aun conociendo la condición en la que se encuentra el puente, que como se había mencionado anteriormente presenta socavación de la cota de cimentación del estribo izquierdo aguas abajo por lo que estos tiempos podrían incluso verse aumentados. Los valores obtenidos se encuentran entre los rangos mencionados, estos valores se encuentran en su máximo definiendo de esta manera que la estructura ha presentado variación en dicho estribo, sin embargo, en baso a rangos definidos, estos tiempos son estables.

6.4.3 Humedad y Temperatura

En la figura 61, se presenta un promedio de los valores de humedad y temperatura obtenidos principalmente en las horas pico anteriormente mencionadas.

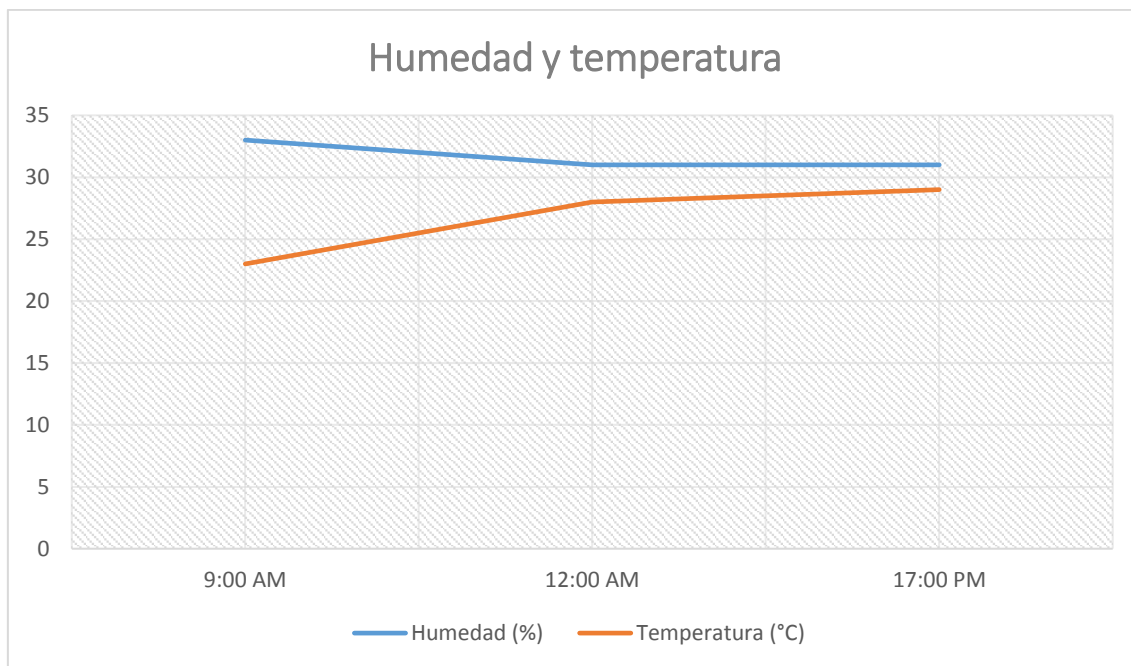


Figura 61. Valores promedio de humedad y temperatura presente en el hormigón de la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la humedad presente en la estructura, se puede observar un valor promedio de 31% RH lo cual, según los especialistas, es un valor alejado del valor normal que debería presentarse en un puente, el cual oscila entre 40% y 60%, esta variación drástica se debe a que el nivel del cauce del río ha decrecido, por lo cual la distancia entre el nivel del río y el puente se ha visto modificada considerando por lo tanto el valor obtenido como un valor normal ya que la estructura se encuentra absorbiendo la humedad del aire. Con respecto a la temperatura del puente, esta no tendrá un valor fijo ya que variará dependiendo de la temperatura ambiental.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos el Ing. Cango expone que se ha verificado de forma objetiva la salud estructural del puente corroborando que la estabilidad, humedad y vibración del mismo se ha visto afectada debido a la socavación presente en uno de sus estribos, sin embargo, los valores obtenidos durante el monitoreo se encuentran dentro de un rango de valores normales, por lo que esta variación se considera aún aceptable. Añade además que la estructura sería capaz de cumplir con el ciclo de vida proyectado, correspondiente a 100 años, sin considerar la presencia de desastres naturales que imprevisiblemente se puedan presentar.

7. DISCUSIÓN

El puente ubicado sobre el río boquerón en el cantón Catamayo, corresponde a una de las infraestructuras principales dentro de la provincia de Loja, ya que es el puente de comunicación vial de mayor luz y de gran envergadura entre diferentes cantones como: Catamayo, Gonzanamá, Sozoranga, Macará. Este, según inspecciones y evaluaciones realizadas por parte del departamento de obras públicas del GAD del cantón Catamayo, ha presentado variaciones en su estabilidad debido a socavación presente en uno de sus estribos, por lo que constituye uno de los principales motivos de su selección para la realización del monitoreo, con el fin de contribuir en la aplicación a tiempo de acciones correctivas.

El desarrollo de un prototipo de WSN basado en el estándar IEEE 802.15.4, permitió la realización eficiente del monitoreo en tiempo real del puente de comunicación vial, con lo cual se pudo obtener valores reales de las condiciones instantáneas de la estructura. Con esto se pudo verificar que el empleo de este tipo de redes tiene gran factibilidad en procesos de monitoreo en tiempo real.

El estudio previo de los tipos de tecnologías de monitoreo existentes, permitió contrastar perfectamente la aplicación de las mismas, así como determinar la más práctica en procesos de monitoreo en tiempo real de estructuras, obteniendo de esta manera los conocimientos y bases sólidas para la realización y aplicación de la WSN en el área a trabajar. El uso de la red *Zigbee* en procesos de monitoreo de estructuras tiene gran acogida y aplicación ya que como se vio en la revisión de literatura posee mayores ventajas en cuanto a monitoreo, comparadas con el resto de redes, ventajas entre las cuales se destaca el uso de bandas libres como 2.4 GHz, su amplia área de trabajo, estabilidad, bajo consumo de energía, entre otros.

Al mismo tiempo, el estudio de las variables que afectan la estabilidad de estructuras, en este caso puentes de comunicación vial, permitió la determinación de las variables con mayor impacto, tales como: humedad, estabilidad, vibración, las mismas que contribuyeron en la determinación de los sensores utilizados durante el proceso de monitoreo.

No obstante, la WSN en procesos de monitoreo obedeció a una topología de red con la finalidad de que el funcionamiento de la misma sea estable y permita la recolección fiable de los datos, es por ello que basándose en los resultados obtenidos durante la simulación de las topologías de red con mayor aplicación en redes de área local como lo son la topología estrella y árbol, se pudo determinar que para el área de trabajo en la cual se va a operar, la topología estrella tiene mayores prestaciones tanto en tiempo de retardo, cantidad de paquetes recibidos, throughput, entre otros. Ya que posee un delay (retardo) de 14ms frente a 18ms de la topología en árbol, velocidad efectiva (throughput) en la cual lleva ventaja con 45 kbps frente a 30 kbps en topología en árbol y finalmente la cantidad de información recibida en la cual esta topología permite la recepción de 20 kbps frente a 10 kbps de topología en árbol. Verificando teóricamente de esta manera que la topología en estrella permitirá el correcto y confiable funcionamiento del prototipo de red de sensores de monitoreo. Destacando, además, que el conocimiento previo del área de trabajo y las características de los equipos a utilizar jugaron un rol importante para la determinación de la topología a implementar.

A continuación, luego de haber determinado la topología de red a implementar, se consideró de gran importancia el desempeño real en campo, para ello se realizaron pruebas de alcance o potencia de recepción con la finalidad de verificar que la topología determinada permitirá el correcto funcionamiento de la red y los equipos a utilizar, pues si el alcance excede un valor máximo, el funcionamiento de la red decaería, este valor es establecido por los fabricantes en 1.6km. Cabe recalcar que para alcanzar esta distancia debe existir como requisito primordial línea de vista entre los nodos sensor y coordinador (emisor y receptor) pues sino esta distancia se vería limitada a 900m.

Una vez realizadas todas las pruebas de verificación de la topología y equipos para WSN, se precisó de una interfaz de comunicación entre el lugar de monitoreo ubicado en un punto cercano a la estructura y la red de sensores ubicados sobre la misma, que permitiera la recolección, presentación y almacenamiento de la información recabada a través de los sensores de monitoreo, es por ello que esta fue realizada en el programa VS Express 2015 permitiendo la interpretación adecuada de la información que se obtuvo durante el proceso de monitoreo. Destacando que no solo se realizó la interpretación de la

información alcanzada, sino además permitió su almacenamiento con cierto nivel de protección al validar datos de usuario.

El funcionamiento del prototipo se evaluó en base a la implementación real de los nodos sensores sobre la estructura, precisando la utilización de: 3 nodos sensores de estabilidad, 1 nodo sensor de vibración y 1 nodo sensor de humedad, colocados específicamente en la acera. Cada uno de los nodos de estabilidad poseen la unidad de sensado dentro las misma, mientras que en los nodos de vibración y humedad esta se encuentra colocada directamente sobre la estructura, fuera del nodo, debido a que de esta manera se obtiene información de forma más eficiente.

Todos los nodos transmiten simultáneamente cada 0.5 segundos, por lo que los módulos hacen uso del mecanismo CSMA-CA con el fin de evitar colisiones y/o cuellos de botella en la red. Luego de establecer la comunicación con el nodo coordinador, la interfaz en su pantalla principal presentará las curvas de valores correspondientes a cada nodo sensor conjuntamente con el análisis de los datos obtenidos en tiempo real verificando de esta manera el buen funcionamiento de la red.

Finalmente, luego de realizar el monitoreo final de la estructura, se retiraban los nodos sensores de su ubicación ya que no existe un sistema de vigilancia en este lugar.

Con la información almacenada durante el proceso de monitoreo a través de la interfaz de comunicación se logró determinar la salud estructural del puente de comunicación vial, obteniendo como resultado que la estructura se ha visto afectada en bajas proporciones en cuanto a estabilidad, vibración y humedad debido a la socavación presente en uno de sus estribos, sin embargo, los valores obtenidos que corresponde a las variables antes mencionadas se encuentran dentro de los rangos de estabilidad. Enfatizando entonces que la estructura sería capaz de cumplir con su ciclo de vida de 100 años sin considerar la presencia de desastres naturales que imprevistamente se puedan presentar. Posteriormente, el costo del prototipo final es de \$ 1214.50, el cual se calculó en base los costos individuales y actuales de cada componente a usar, estos costos se detallan en el Anexo V.

En base a todo lo antes mencionado sobre el trabajo realizado se pudo verificar la importancia de la aplicación de redes de sensores en estructuras, y sobre todo la aplicación de la tecnología *Zigbee* basada en el estándar IEEE 802.15.4, puesto que esta permitió la obtención, interpretación y transmisión confiable de información en un área de trabajo considerable, con funcionamiento estable y operando en una banda de frecuencias libre, permitiendo de esta manera la toma de decisiones acertadas sobre el tratamiento de la estructura.

Para finalizar, cabe recalcar que los problemas técnicos que se presentaron a lo largo de las pruebas del prototipo fueron: duración de baterías y funcionamiento inestable del sensor de vibración. Para la resolución del problema de duración de baterías se realizó un análisis de las características eléctricas principales de los equipos a utilizar con el fin de obtener un valor específico de potencia a ser cubierto, obteniendo de esta manera que la potencia a consumir sería de 0.25 W misma que podría ser proporcionada durante por lo menos 2 días a través de baterías de gel recargables por lo que se hizo selección de este tipo de baterías, tomando además como alternativa el uso de paneles solares.

Para la resolución del funcionamiento inestable del sensor de vibración, se realizó ejercicios de prueba y error. Durante la primera prueba se hizo uso del sensor de vibración SW18020P, el cual detectaba vibraciones producidas únicamente por vehículos de 3 ejes, sin embargo, la estructura presentaba vibración con el paso de vehículos de diferente tipo, por lo que se precisó de un sensor cuya sensibilidad sea aún mayor, por lo que se utilizó el sensor SW420 de la misma serie, pero con mayor ajuste de sensibilidad.

8. CONCLUSIONES

- ✎ La correcta selección del lugar de ubicación de los nodos sensores juega un rol fundamental en la ejecución de monitoreo, ya que de esto dependerá la obtención de información confiable referente a las condiciones de la estructura. Es preciso la realización del método de observación de las condiciones de la estructura para la selección de estos lugares, puesto que durante la realización de este método se puede detectar problemas presentes. La estructura objeto de monitoreo presenta una variación en su estabilidad debido a la socavación presente en uno de sus estribos, por lo que el monitoreo en esta zona permitirá avalar los criterios proporcionados durante una inspección visual.
- ✎ La selección de la tecnología de comunicación juega un rol importante en el desarrollo de una red de sensores, pues de esta depende el alcance de 100 metros de la comunicación entre los dispositivos que conformarán la red, además de permitir la reducción de costos de implantación e implementación, es por ello que, basándose en la investigación realizada tanto en capacidad como en costos, la tecnología utilizada en esta aplicación es la tecnología *Zigbee* con red de sensores inalámbricos, los cuales presentan una ventaja de costo de aproximadamente el 95% frente a redes de sensores basados en fibra óptica y funcionamiento estable para esta aplicación.
- ✎ Las excelentes características de la red de sensores inalámbricos *Zigbee* como bajo costo, fiabilidad, estabilidad, bajo consumo de energía y alcance, le han permitido posesionar entre la tecnología más utilizada en procesos de monitoreo y control como por ejemplo el caso del sistema de monitoreo del volcán Tungurahua, permitiendo la obtención confiable y rápida de información.
- ✎ La correcta selección de sensores de monitoreo es de gran importancia y dependerá principalmente del tipo de estructura a monitorear, su ubicación y condición, pues esto permitirá la obtención fiable y precisa de información acerca de las condiciones instantáneas de la estructura en evaluación.
- ✎ La simulación de las topologías en estrella y árbol, haciendo uso del estándar

IEEE 802.15.4, permitió conocer de forma teórica el funcionamiento y rendimiento de la red de sensores a implementar permitiendo obtener un *delay* (retardo) de 14ms en topología estrella frente a 18ms de la topología en árbol, velocidad efectiva (*throughput*) en la cual la topología estrella lleva ventaja con 45 kbps frente a 30 kbps en topología en árbol y finalmente la cantidad de información recibida en la cual la topología estrella permite la recepción de 20 kbps frente a 10 kbps de topología en árbol, contribuyendo finalmente de esta manera en la selección de la topología idónea (topología en estrella) a ser utilizada en la WSN.

- ✎ La verificación de la potencia de recepción mediante el software X-CTU, permitió determinar el alcance de la red, corroborando de esta manera la veracidad de la información de alcance proporcionada por el fabricante de los equipos, demostrando de esta manera la factibilidad de la tecnología *Zigbee* en la ejecución del trabajo.
- ✎ La implementación de la WSN sobre la estructura a monitorear, principalmente la ubicación del nodo de vibración y humedad en el estribo izquierdo aguas abajo, permitió determinar la veracidad de la información obtenida a través del simulador de red OPNET, además contribuyó a conocer la salud estructural de la misma a través de la información que proporcionaron los sensores acerca de su estabilidad, vibración y humedad, con lo cual se determinó que la estructura actualmente se mantiene dentro de rangos normales de estabilidad, por lo que sí es posible alcanzar el tiempo de vida de 100 años pronosticado para la misma.
- ✎ Una interfaz de comunicación entre el lugar y la red de monitoreo es una herramienta importante para una persona que desconoce el funcionamiento de los sensores de monitoreo, es por ello que se desarrolló una interfaz haciendo uso del programa *VS Express 2015*, la misma que permitió la recolección, interpretación y presentación de la información obtenida a través de la red de sensores en graficas que facilitaron la comprensión de la información, además se presentó un análisis instantáneo de las condiciones de la estructura por cada uno de los nodos de la red.

9. RECOMENDACIONES

- ✎ Para trabajos futuros de monitoreo, se recomienda el desarrollo e implementación de una red de comunicación remota adjunta al trabajo realizado, ya que, la comunicación a través de red celular aun es deficiente en este lugar por lo que no es conveniente el uso de esta para una comunicación remota, esto con el fin de no trasladarse hacia el sitio donde se encuentra la estructura de monitoreo.
- ✎ Para la obtención de información con mayor precisión, se recomienda considerar el diseño de una estructura de comunicación vial inteligente, es decir, con sensores de monitoreo incluidos dentro de la misma, a fin de ayudar en la aplicación a tiempo de acciones correctivas.
- ✎ Se recomienda que durante el proceso de selección de los módulos de comunicación *Zigbee*, se tome en cuenta las características de compatibilidad, ya que si bien es cierto esta es compatible con otros módulos de esta tecnología, pero existe una excepción en cuanto a la serie 1 y 2.
- ✎ La selección correcta de los sensores de monitoreo es de gran importancia pues a pesar de funcionar correctamente fuera de la estructura de monitoreo luego de la implementación en la misma su funcionamiento no es el correcto, esto en cuanto a sensores de vibración y humedad.
- ✎ Se debe tener cuidado durante la configuración y manipulación de los módulos de comunicación *Zigbee*, pues una configuración errónea en cuanto a modos de bajo consumo puede ocasionar el daño permanente del dispositivo. Además, la alimentación de esta debe ser la establecida por su fabricante, ya que de ser el caso de suministrar un mayor voltaje el daño del dispositivo sería instantáneo.
- ✎ Es necesario tomar en cuenta durante el monitoreo que no exista otro programa abierto que haga uso del puerto de comunicación donde se encuentra conectado el nodo coordinador, puesto que si esto sucede el funcionamiento de la interfaz no sería como se espera.

- ✎ El almacenamiento de la información obtenida durante el proceso de monitoreo es importante puesto que permitirá la toma de decisiones por parte del personal encargado de la estructura, en la interfaz se realiza el almacenamiento manual de la información, sin embargo, para trabajos posteriores sería de gran ayuda incorporar herramientas que permitan el almacenamiento automático en base de datos de la información recabada, con el fin de facilitar el manejo de la misma.
- ✎ En cuanto a seguridad de la información, cada nodo de la red se encuentra formando su propia trama de información, sin embargo, para trabajos a futuro se recomienda aumentar el nivel de seguridad pues se puede hacer uso del modo de operación API en todos los nodos y trabajar de esta manera con tramas creadas por cada dispositivo.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. *Monitoreo de salud estructural*. **Johannio Marulanda y Peter Thomas**. 2, Cali-Colombia : Ingeniería y competitividad, 2000, Vol. 2.
2. **Branko Glisic y Daniele Inaudi**. *Fibre optic methods for structural health monitoring*. s.l. : John Wiley & Sons, 2007.
3. **Joel Cortés**. *Aplicaciones de series de tiempo en el monitoreo estructural*. México : s.n., 2011.
4. *Identificación y análisis de patologías en puentes de carreteras urbanas*. **Mascia, Nilson Tadeu y Sartorti, Artur Lenz**. 1, Sao Paulo, Brazil : Revista ingeniería de construcción, 2011, Vol. 6.
5. **Díaz, Sergio Andrés Valenzuela**. *Metología de gestión de puentes a nivel de red basada en inspección visual*. Santiago-Chile : s.n., 2008.
6. **Jim J Zhao y Demetrio Tonias**. *Bridge engineering*. EE.UU : Mc Grae-Hill Education, 2007.
7. **Edgar Muñoz**. *Ingeniería de puentes*. Bogotá Colombia : Javeriana, 2012.
8. **Santiago Parra y German Sedano**. Desarrollo de una metodología para la evaluación del estado de puentes existentes. Bogotá, Colombia : s.n., diciembre de 2011.
9. **Guevara, Maria Elvira**. *Socavación en puentes*. Popayán : UC, 2003.
10. *Erosión en pilares y bordes de puentes*. **Rocha, Arturo**. 2013. IV congreso internacional de la construcción-ICG.
11. **Juan Pablo Amézquita**. Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras. San Juan del río-Querétano : s.n., 2012.
12. **Rodríguez, Raúl**. Corrosión en estructuras de acero. *INTEMAC*. [En línea] http://www.intemac.es/?intemac_servicio=corrosion-en-estructuras-de-acero..
13. **Tanenbaum, Wetherall**. *Redes de computadoras*. Mexico : Pearson, 2012.

14. *Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors*. **Daniele Inaudi, y otros**. s.l. : Smart Materials and Structures, 2000, Vol. 7.
15. **Unidad de puentes**. *Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentación inalámbrica*. San José-Costa Rica : s.n., 2013.
16. **Domingo Paillet y Bárbara Pérez**. Interferómetro de Michelson: Resolución. *Academia*. [En línea] https://www.academia.edu/9675661/INTERFER%3%93METRO_DE_MICHELSON_RESOLUCI%3%93N.
17. **Scott Meller**. Extrinsic Fabry-Perot Interferometer System Using Wavelength Modulated Source. Virginia : s.n., 1996.
18. *Caracterización de rejillas de bragg en fibra optica*. **H.H Cerecedo y L. A. Zenteno**. México : Revista mexicana de física, 1999, Vol. 1.
19. *Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos*. **Diana Archila y Frey Santamaría**. 1, s.l. : Revista TIA, 2013, Vol. 2.
20. **Jerome Lynch y Kenneth Loh**. A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. [En línea] marzp de 2006. <http://www-personal.umich.edu/~jerlynch/papers/SVDReview.pdf>.
21. **Jjiang Jianjing, Lu Xinzheng y Guo Jingjun**. Study for Real-time Monitoring of LargeSpan Bridge Using GPS. [En línea]
22. *Redes de sensores inalámbricos*. **Aaakvaag Niels y Jan_Erick Frey**. 1, s.l. : Revista ABB, 2006, Vol. 2.
23. **Edgar Maya**. Red inalámbrica de sensores a través de 6lowpan para una agricultura de precisión aplicado en la hacienda cananvalle de la ciudad de ibarra. Quito : s.n., 2014.
24. **García, Alberto Herrera**. Localización de nodos dentro de una red inalámbrica de sensores. Barcelona-España : s.n., junio de 2009.
25. **Rodrigo Muñoz**. Interconexión de redes de sensores inalámbricos 802.15.4 en localizaciones remotas. Madrid-España : s.n., 2011.

26. **Jorge Dignani.** Análisis del protocolo Zigbee. [En línea] 2011. http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes_y_Seguridad/Trabajos_Finales/Dignanni_Jorge_Pablo.pdf.
27. **María Acosta.** Estudio del estándar IEEE 802.15.4 Zigbee para comunicaciones inalámbricas de área personal de bajo consumo de energía y su comparación con el estándar 802.15.1 bluetooth. Quito-Ecuador : s.n., 2006.
28. **César Rodríguez.** Eficiencia y seguridad en bluetooth y zigbee. México : s.n., 2012.
29. **XBEE.CL.** Quees Xbee. *XBEE.CL*. [En línea] <http://xbee.cl/que-es-xbee/>.
30. **DIGI.** Soluciones inalámbricas. *Digi International*. [En línea] <http://www.sase.com.ar/2013/files/2013/09/SASE2013-XBee.pdf>.
31. **INVDESPRO MX.** Xbee comunicaciones inalámbricas. *INVDESPRO MX*. [En línea] 2014. <http://modulosxbee.blogspot.com/2014/01/configuracion-del-modulo-xbee.html>.
32. **Ochoa, María Elena.** Desarrollo de un prototipo de red inalámbrica de sensores bajo el estándar IEEE 802.15.4 (zigbee) para el monitoreo de variables ambientales en el jardín botánico Reinaldo Espinosa de la Universidad Nacional de Loja. Loja-Ecuador : s.n., 2016.
33. *Simulación de tráfico en redes inalámbricas mediante NS2.* **Ana María López y Nicolás García.** 44, Pereira : s.n., 2010. 0122-1701.
34. **Dpto. de ingeniería en telemática.** Openet: Manual de usuario. [En línea] Septiembre de 2004. http://ansat.es/soporte/docs/fragmentacion/OPNET_Modeler_Manual.pdf.
35. **5Hertz.** ABC del acelerómetro. *Electrónica 5 Hertz*. [En línea] febrero de 2014. Disponible en: <http://5hertz.com/tutoriales/?p=228> .
36. **Analog Device.** Digital Accelerometer: ADXL345. *Spark fun Electronics*. [En línea] Mayo de 2009. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>.

37. **Aosong Electronics.** Temperature and humidity module, DHT11 product manual. *Aosong Electronics.* [En línea] <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>.
38. **Elecdesign Works.** SW-420 vibration sensor module. *Elecdesign Works.* [En línea] 2013. <http://www.elecdesignworks.com/prod0057?tmpl=component&format=pdf&iframe=true&width=800&height=550>.
39. **Ojed:, L. T.** Arduino Uno. *Arduino.* [En línea] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.
40. **DIGI.** Zigbee RF Module: Xbee2, XbeePro2, PRO S2B. *Digi international.* [En línea] 2026. <http://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>.
41. *Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes.* **Francisco Navarro.** 4, s.l. : Tecnología en marcha, 2014, Vol. 27.

11. ANEXOS

ANEXO I: ABREVIATURA

MSE	Monitoreo de Salud Estructural
WSN	Wireless Sensor Network (Red de sensores inalámbrica)
SE	Salud Estructural
SOFO	Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques (Monitoreo de Estructuras por Fibra Óptica)
FBG	Fiber Bragg Grating (Fibra de Rejilla de Bragg)
RAM	Random Access memory (Memoria de acceso aleatorio)
GPS	Global Position System (Sistema de posicionamiento global)
PAN	Personal Area Network (Red de área personal)
LAN	Local Area Network (Red de área local)
MAN	Metropolitan Area Network (Red de área metropolitana)
WAN	Wide Area Network (Red de área extendida)
Tx	Transmisor
Rx	Receptor
WLAN	Wireless Local Area Network (Red de área local inalámbrica)
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance (Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones)

APL	Application Layer (Capa de aplicaciones)
MAC	Media Access Control (Control de acceso al medio)
ZDO	Zigbee device object (objeto del dispositivo Zigbee)
AODV	Ad Hoc On-Demand Vector Routing (Enrutamiento vectorial Ad Hoc bajo demanda)
HDR	Header (Encabezado)
WiFi	Wireless Fidelity (Fidelidad Inalámbrica)
AT	Comandos que conforma un lenguaje de comunicación entre el usuario y el terminal.
API	Aplicación de interfaz de programación
CH	Channel (Canal de operación en Zigbee)
DH	Detination High (Dirección de destino en alto)
DL	Detination Low (Dirección de destino en bajo)
SH	Source High (Dirección de origen en alto)
SL	Source Low (Dirección de origen en bajo)
SM	Sleep Mode (Modo de bajo consumo)
DC	Direct current (Corriente directa)
E/S	Entrada/Salida
OPNET	OPTimized Network Engineering Tool (Herramienta de ingeniería de red optimizada)
NS2	Network Simulator 2 (Simulador de red 2)

I2C	Inter-Integrated circuit (Circuito interintegrado)
LPF	Loss Path Free (Pérdidas en el espacio libre)
PDR	Potencia de recepción
EST_PARTE_INF	Estabilidad parte inferior
EST_PARTE_CENTRAL	Estabilidad Parte central
EST_PARTE_SUP	Estabilidad Parte superior
RH	Humedad relativa

ANEXO II: CONSTITUCIÓN DE LOS NODOS SENSORES

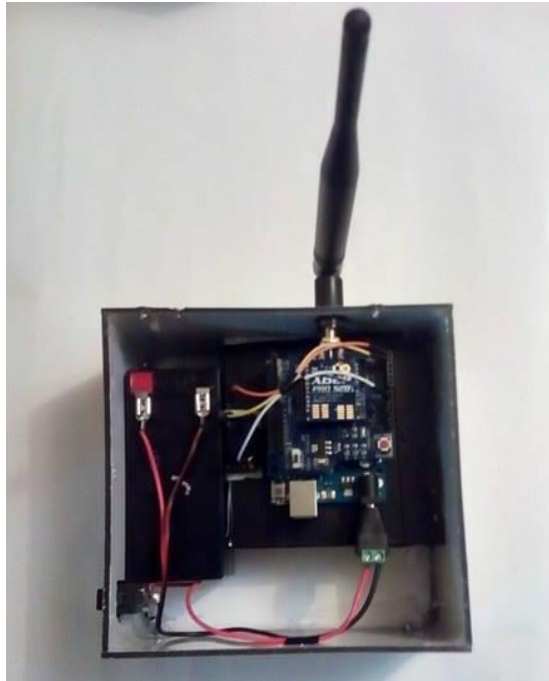


Figura 62. Constitución de los nodos sensores de estabilidad.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 63. Constitución del nodo sensor de vibración.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 64. Constitución del nodo sensor de humedad.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO III: CONSTITUCIÓN DEL NODO COORDINADOR Y CONFORMACIÓN DE LA WSN

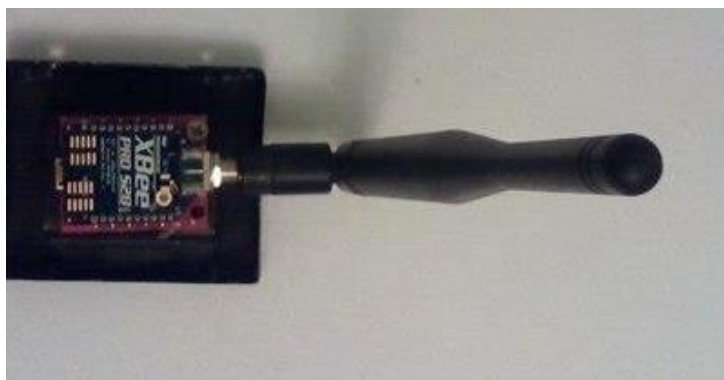


Figura 65. Constitución del nodo coordinador.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 66. Conformación de la WSN con todos sus nodos.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO IV: ESTRUCTURA DE MONITOREO

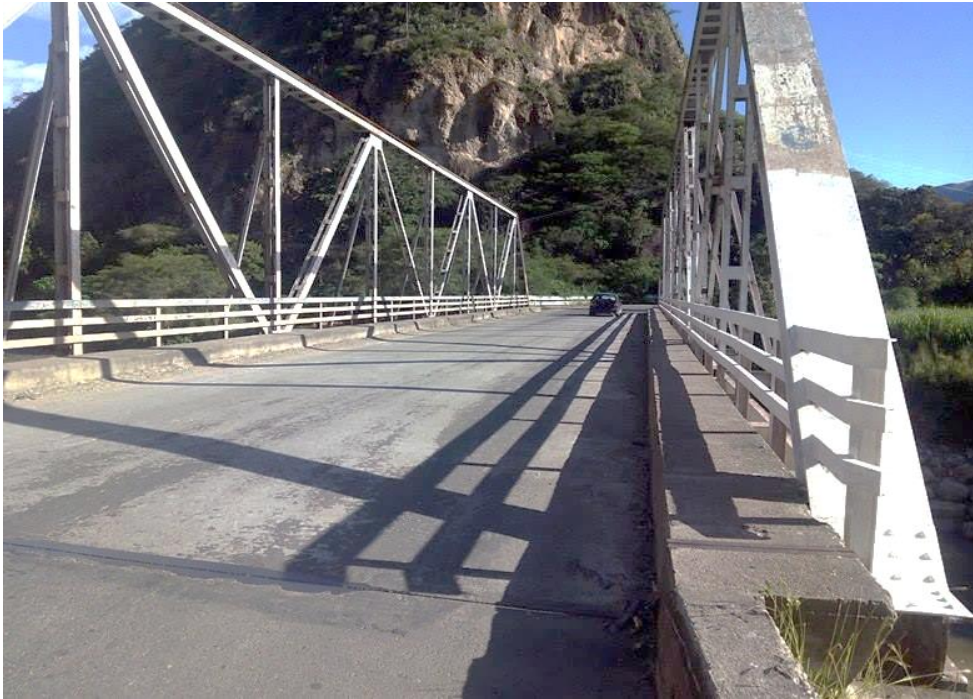


Figura 67. Estructura de monitoreo, vista lateral.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 68. Estructura de monitoreo, vista frontal.

Fuente: Elaboración propia.



a)



b)

Figura 69. a) Corrosión en el acero de los elementos primarios de la estructura, b) Relleno en socavación presente en el estribo izquierdo.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 70. Ubicación de los nodos sensores 1, 3 y 4 sobre la estructura para su monitoreo. Vistos de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO V: COSTO DEL PROTOTIPO

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
5u	Placa arduino uno	\$ 15,00	\$ 75,00
5u	Xbee Shield pro S2B	\$ 14,00	\$ 70,00
5u	Módulo Xbee pro S2B	\$ 74,66	\$ 373,30
5u	Batería 12V/1.3Ah	\$ 10,96	\$ 54,80
5u	Antena de 7dBi	\$ 6,14	\$ 30,70
3u	Acelerómetro adxl335	\$ 7,90	\$ 23,70
1u	Sensor de temperatura Dht11	\$ 4,50	\$ 4,50
1u	Sensor de vibración sw420	\$ 4,50	\$ 4,50
5u	Caja de nodo sensor	\$ 6,00	\$ 30,00
1u	Caja de nodo coordinador	\$ 10,00	\$ 10,00
1u	Xbee explorer USB	\$ 33,00	\$ 33,00
1u	Cables y plug para arduino	\$ 5,00	\$ 5,00
1u	Diseño y construcción del prototipo	\$ 500,00	\$ 500,00
TOTAL			<u>\$ 1.214,50</u>

Tabla 16. Costo total del prototipo

Fuente: Elaboración propia.