

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

### MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

---

**Tema:** “SISTEMA DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM) DE PUENTES DE HORMIGON MEDIANTE REDES WSN”

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del Grado Académico de  
Magister en Telecomunicaciones

Modalidad de Titulación “Proyecto de Desarrollo”

**Autor:** Ingeniero, Saúl Gabriel López Naranjo

**Director:** Ingeniero, Fabián Rodrigo Salazar Escobar, PhD.

Ambato – Ecuador

2021

i

## **APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación, presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia Magíster, e integrado por los señores Ingeniero Carlos Diego Gordón Gallegos, Doctor e Ingeniera Ana Pamela Castro Martín Magíster, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “SISTEMA DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM) DE PUENTES DE HORMIGON MEDIANTE REDES WSN”, elaborado y presentado por el señor Ingeniero Saúl Gabriel López Naranjo, para optar por el Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia Mg.  
**Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa**

-----  
Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD.  
**Miembro del Tribunal de Defensa**

-----  
Ing. Ana Pamela Castro Martín, Mg  
**Miembro del Tribunal de Defensa**

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo Titulación presentado con el tema: “SISTEMA DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM) DE PUENTES DE HORMIGON MEDIANTE REDES WSN”, le corresponde exclusivamente a: Ingeniero Saúl Gabriel López Naranjo, Autor bajo la Dirección del Ingeniero Fabián Rodrigo Salazar Escobar PhD, director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Saúl Gabriel López Naranjo

**AUTOR**

-----  
Ing. Fabián Rodrigo Salazar Escobar, PhD.

**DIRECTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Saúl Gabriel López Naranjo

c.c..1804141560

# ÍNDICE GENERAL

Pág.

## Contenido

PORTADA .....	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
AUTORIA DEL TRABAJO DE INVESTIGACION .....	iii
DERECHOS DEL AUTOR .....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
INDICE DE TABLAS.....	ix
INDICE DE FIGURAS .....	xi
AGRADECIMIENTO.....	xiv
DEDICATORIA.....	xv
RESUMEN EJECUTIVO .....	xvi
EXECUTIVE SUMMARY .....	xviii
<b>CAPITULO I .....</b>	<b>1</b>
PROBLEMA DE LA INVESTIGACION.....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Justificación.....	2

1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	General.....	4
1.3.2	Específicos.....	4

**CAPÍTULO II..... 5**

ESTADO DEL ARTE .....	5
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	5
2.2 MARCO TEÓRICO .....	9
2.2.1 Tipo de Puentes.....	9
2.2.2 Clasificación de Puentes.....	12
2.2.3 Factores capaces de desencadenar el colapso estructural y sus causas. ....	14
2.2.4 Sistema de monitoreo de salud estructural en puentes .....	14
2.2.5 Análisis de Daños en Puentes.....	15
2.2.8 Método de vibración experimental en puentes, utilizado para la medición de dicha vibración. ....	25
2.2.9 Normativas usadas para el análisis de vibraciones.....	25
2.2.10 Redes inalámbricas.....	34
2.2.10.1 Tipos de redes inalámbricas según su cobertura.....	34
2.2.12 Red de sensores inalámbricos (WSN) .....	36
2.2.12.1 Características de una red de sensores inalámbricos (WSN).....	36
2.2.12.1 Elementos y dispositivos que componen una red WSN .....	37
2.13.4 Topologías de redes de sensores inalámbricos (WSN).....	38
2.2.14 Protocolos de comunicación inalámbrica para el estándar 802.15.x.x .....	40
2.2.16 Arduino.....	42
2.2.16.1 Arduino IDE .....	42

<b>CAPITULO III</b> .....	55
MARCO METODOLOGICO .....	55
3.1 Ubicación.....	55
3.2 Equipos y Materiales .....	57
3.3 Tipo de Investigación .....	58
3.6 Recolección de Información.....	58
3.7 Procesamiento de la Información y Análisis Estadístico .....	59
3.8 Variable respuesta o Resultados Alcanzados .....	59
<b>CAPITULO IV</b> .....	60
RESULTADOS Y DISCUSION .....	60
4.1 DISEÑO DE LA RED DE SENSORES INALAMBRICA .....	60
4.2 TOPOLOGIA DE LA RED WSN.....	61
4.3 NODO COORDINADOR ZIGBEE.....	63
4.4 NODOS TERMINALES ZIGBEE.....	66
<b>CAPITULO V</b> .....	78
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBIOGRAFIA Y ANEXOS .....	78
5.1 Conclusiones.....	78
5.2 Recomendaciones .....	79

5.3 BIBLIOGRAFIA .....	80
5.4 ANEXOS .....	87



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2.2.2.1:</b> Clasificación de Puentes.....	13
<b>Tabla 2.2.2.2:</b> Factores que implican el colapso de una estructura.....	14
<b>Tabla 2.2.7.3:</b> Pesos y Densidades de los Materiales.....	20
<b>Tabla 2.2.7.4:</b> Propiedades de los materiales del Puente.....	21
<b>Tabla 2.2.7.5:</b> Rango de Luces permitidas Según el tipo de estructura.....	22
<b>Tabla 2.2.7.6:</b> Deflexiones para estados límites de carga.....	23
<b>Tabla 2.2.7.7:</b> Esfuerzos máximos para estados límites de carga.....	24
<b>Tabla 2.2.9.8:</b> Norma Australiana (Australia 2187.2).....	25
<b>Tabla 2.2.9.9:</b> Norma Británica (British Estándar 7385).....	26
<b>Tabla 2.2.9.10:</b> Norma Brasileña (NBR9653).....	26
<b>Tabla 2.2.9.11:</b> Norma CMRI.....	27
<b>Tabla 2.2.9.12:</b> Norma DGMS India.....	28
<b>Tabla 2.2.9.13:</b> Norma Alemana (DIN4150).....	29
<b>Tabla 2.2.9.14:</b> Norma Neozelandesa (NZS 4403).....	29
<b>Tabla 2.2.9.15:</b> Norma Indonesia (SNI7571).....	30

<b>Tabla 2.2.9.16:</b> Norma Española (Criterio de Prevención UNE 22.381).....	31
<b>Tabla 2.2.9.17:</b> Norma Suiza (Swiss Standard SN 640 312a).....	31
<b>Tabla 2.2.9.18:</b> Norma Canadiense (Toronto514).....	32
<b>Tabla 2.2.9.19:</b> Rango de frecuencias en relación con tipos de daños.....	32
<b>Tabla 2.2.11.20:</b> Estandares y Tecnologías de las WPAN.....	35
<b>Tabla 2.2.11.19:</b> Tabla Comparativa del Módulo Arduino Nano .....	47
<b>Tabla 3.1.21:</b> Equipos y materiales.....	5

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 2.1:</b> Puente de viga .....	9
<b>Figura 2. 2:</b> Puente de ménsula.....	10
<b>Figura 2.3:</b> Puente de arco.....	10
<b>Figura 2.4:</b> Puente colgante .....	11
<b>Figura 2.5:</b> Puente atirantado.....	12
<b>Figura 2.6:</b> Esfuerzo de tracción y compresión.....	18
<b>Figura 2.7:</b> Esfuerzo de flexión.....	18
<b>Figura 2.8:</b> Torsión.....	19
<b>Figura 2.2.7.9:</b> Fuerzas distribuidas y peso sobre una placa o losa.....	21
<b>Figura 2.2.7.10.</b> Cargas vivas de un puente, situación extrema de carga viva.....	23
<b>Figura 2.2.10.11:</b> Cobertura redes inalámbricas en el mundo .....	33
<b>Figura 2.2.12.12:</b> Elementos de una Red WSN.....	37
<b>Figura 2.2.13.13:</b> Topología Estrella.....	37
<b>Figura 2.2.13.14:</b> Topología malla.....	38
<b>Figura 2.2.13.15:</b> Topología árbol.....	39
<b>Figura 2.2.15.16:</b> Arquitectura del Estándar ZigBee.....	40
<b>Figura2.2.17.16:</b> Sensor ADXL335.....	42
<b>Figura 2.2.17.17:</b> Diagrama Pines Sensor ADXL 335.....	42
<b>Figura 2.2.17.18:</b> Diagrama Esquemático Sensor ADXL 335.....	43
<b>Figura 2.2.17.19:</b> Arduino Nano.....	43
<b>Figura 2.2.17.20:</b> Diagrama Esquemático Arduino Nano.....	44
<b>Figura 2.2.17.21:</b> Transmisor Xbee S2C.....	45
<b>Figura 2.2.17.22:</b> Distribución de Pines Transmisor Xbee S2C.....	45

<b>Figura 2.2.17.22:</b> Distribución Esquemático Transmisor Xbee S2C.....	46
<b>Figura 2.2.17.23:</b> Modulo de Tarjeta SD Arduino.....	46
<b>Figura 2.2.17.24:</b> Modulo Reloj DS3231Arduino.....	47
<b>Figura 2.2.17.25:</b> Diagrama de Pines Módulo DS3231Arduino.....	47
<b>Figura 2.2.17.26:</b> Diagrama Esquemático Módulo DSC3231.....	48
<b>Figura 2.2.17.27:</b> SENSOR DHT22.....	49
<b>Figura 2.2.17.27:</b> Componentes del SENSOR DHT22.....	50
<b>Figura 2.2.17.28:</b> Pantalla LCD 16x2 HD44780.....	50
<b>Figura 2.2.17.29:</b> Distribución de Pines Pantalla LCD 16x2 HD44780.....	51
<b>Figura 3.1:</b> Ubicación geográfica del puente a analizar.....	52
<b>Figura 3.2:</b> Puente “La Delicia” (Vista de Frente).....	53
<b>Figura 3.3:</b> Puente “La Delicia” (Vista Lateral).....	53
<b>Figura 3.4:</b> Composición estructural del Puente “La Delicia” .....	54
<b>Figura 4.1:</b> Diagrama General de la Red WSN.....	57
<b>Figura 4.2:</b> Esquema de Sistema de Monitoreo.....	58
<b>Figura 4.3:</b> Diagrama Red WSN.....	59
<b>Figura 4.4:</b> Esquema del Nodo Coordinador.....	60
<b>Figura 4.5:</b> Diagrama del Nodo Coordinador.....	60
<b>Figura 4.6:</b> Diseño de la placa para Nodo Coordinador.....	61
<b>Figura 4.7:</b> Elaboración de la placa del Nodo Coordinador.....	61
<b>Figura 4.8:</b> Ensamblaje del Nodo Coordinador.....	62

<b>Figura 4.9:</b> Esquema del Nodo Coordinador.....	63
<b>Figura 4.10:</b> Diagrama del Nodo Coordinador.....	63
<b>Figura 4.11:</b> Diseño de la placa para los Nodos Terminales.....	64
<b>Figura 4.12:</b> Elaboración de las placas de los Nodos Terminales.....	64
<b>Figura 4.13:</b> Ensamblaje de los Nodos Terminales.....	65
<b>Figura 4.14:</b> Prototipo de la Red WSN.....	65
<b>Figura 4.15:</b> Ingreso este del puente “La Delicia”.....	66
<b>Figura 4.16:</b> Ubicación de los nodos terminales en la estructura del puente .....	67
<b>Figura 4.17:</b> Señalización de los nodos terminales.....	67
<b>Figura 4.18:</b> Montaje del nodo coordinador “Estación Base”.....	68
<b>Figura 4.19:</b> Encendido y verificación de la comunicación de la Red WSN.....	68
<b>Figura: 4.20:</b> Monitoreo de las vibraciones de la estructura analizada.....	69
<b>Figura: 4.21:</b> Registros del Monitoreo de las vibraciones de la estructura analizada.....	70
<b>Figura 4.22:</b> Comportamiento del nodo A.....	71
<b>Figura 4.23:</b> Comportamiento del nodo B.....	71
<b>Figura 4.24:</b> Comportamiento de la estructura del puente.....	72
<b>Figura: 4.25:</b> Registro del monitoreo de las vibraciones de la estructura analizada.....	73
<b>Figura 4.26:</b> Comportamiento de la estructura del puente .....	74

## **AGRADECIMIENTO**

A todas aquellas personas que, me brindaron su ayuda, y colaboración. Depositando su confianza en mí, persona, demostrando que el esfuerzo y trabajo duro pueden llegar a cumplir una meta más.

Saúl Gabriel López Naranjo

## **DEDICATORIA**

Para mis padres, Saúl y Gloria quienes con su espíritu de lucha y apoyo constante hicieron posible que llegara a alcanzar todos mis sueños y propósitos en esta vida, también a todas aquellas personas que forman parte importante de mi vida que de una u otra manera me brindaron su apoyo en los momentos que más los necesite, ahora es el momento de regresar algo de todo lo que compartieron y formaron en mí.

Saúl Gabriel López Naranjo

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:**

**“SISTEMA DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM) DE  
PUENTES DE HORMIGON MEDIANTE REDES WSN”**

**AUTOR:** Ingeniero, Saúl Gabriel López Naranjo

**DIRECTOR:** Ingeniero Fabián Rodrigo Salazar Escobar, PhD.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Tecnologías, Seguridad y Gestión de Redes de Comunicaciones, Comunicaciones

**FECHA:** 28 de Octubre del 2021

**RESUMEN EJECUTIVO**

En el presente proyecto se diseña un sistema de monitoreo de salud estructural (SHM Structural Health Monitoring), basado en redes WSN para controlar la integridad, seguridad y rendimiento de la estructura de un puente de hormigón mediante el despliegue de varios sensores, encargados de registrar constantemente las vibraciones provocadas por el flujo vehicular, peatonal o debido a eventos impredecibles provocados por naturaleza, como son sismos, vientos fuertes etc.

Esta red de sensores inalámbrica posee una arquitectura dinámica, conformada por varias etapas, primero están los sensores también conocidos como nodos los cuales están ubicados en los puntos más críticos de la estructura, los mismos que se encargan de registrar las vibraciones durante intervalos de tiempo. Posteriormente la



información obtenida es transmitida por señales de radiofrecuencia hacia el nodo central o Gateway, encargado de recolectar la información recibida desde los nodos y compartirla hacia un ordenador ubicado en la estación base.

Como resultado del monitoreo se encontró una fuerte correlación entre la longitud del puente y sus respectivos períodos de vibración; así, independientemente del espesor de la estructura de hormigón del puente.

Con esta investigación se estableció una línea base o de referencia sobre el comportamiento de este tipo de puentes, de manera que en el futuro se dé un seguimiento y actualización continua de la información registrada, con la intención de predecir fallas y daños causados ya sea por el flujo vehicular, humano o debido a las fuerzas ambientales a las que está expuesto el puente.

**Descriptores:** Redes WSN, vibraciones, Monitoreo Salud Estructural (SHM), Zigbee, daños, Arduino, Puentes de Hormigón, Tráfico Vehicular.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**THEME:**

**“STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM (SHM) OF  
CONCRETE BRIDGES THROUGH WSN NETWORKS”**

**AUTHOR:** Ing. Saúl Gabriel López Naranjo

**DIRECTED BY:** Ing. Fabián Rodrigo Salazar Escobar, PhD.

**LINE OF RESEARCH:** Technologies, Security and Management of  
Communications Networks, Communications

**DATE:** October 28th, 2021

**EXECUTIVE SUMMARY**

This project designs a structural health monitoring system (SHM Structural Health Monitoring), based on WSN networks to control the integrity, safety and performance of the structure of a concrete bridge through the deployment of several sensors, responsible for constantly recording the vibrations caused by vehicular flow, pedestrian or due to unpredictable events caused by nature, such as earthquakes, high winds etc..

This wireless sensor network has a dynamic architecture, consisting of several stages, first there are the sensors also known as nodes which are located at the most critical points of the structure, the same that are responsible for recording the vibrations during time intervals. Subsequently, the information obtained is transmitted by radiofrequency signals to the central node or Gateway, which is in charge of

collecting the information received from the nodes and sharing it with a computer located at the base station.

As a result of the monitoring, a strong correlation was found between the length of the bridge and its respective vibration periods, regardless of the thickness of the concrete structure of the bridge.

With this research, a baseline or reference line on the behavior of this type of bridges was established, so that in the future there will be a continuous follow-up and updating of the recorded information, with the intention of predicting failures and damages caused either by the vehicular or human flow or due to the environmental forces to which the bridge is exposed.

**Keywords:** WSN Networks, vibrations, Structural Health Monitoring (SHM), Zigbee, damage, Arduino, Concrete Bridges, Vehicle Traffic.

# **CAPITULO I**

## **PROBLEMA DE LA INVESTIGACION**

### **1.1 Introducción**

Actualmente, existen distintos tipos de estructuras civiles creadas por la Ingeniería, tales como puentes, edificio, túneles, entre otros. Gracias al avance de la tecnología y de acuerdo a las normas establecidas para estos tipos de construcciones, la calidad de estas estructuras ha ido mejorando a lo largo del tiempo. Sin embargo, debido a su localización y la exposición a factores externos ya sea naturales (vientos, sismos, factores ambientales) o humanos (alto tránsito, mal mantenimiento). Pueden causar potenciales daños, que a largo plazo pueden provocar un deterioro de dicha estructura, siendo necesario una reparación parcial o total de la misma.

El campo de estudio en cuanto a los temas de mantenimiento de obras de infraestructura vial está mostrando un progreso rápido, existen diferentes tipos de tecnología utilizada para el análisis y detección de fallas en estructuras, dependiendo de los parámetros o datos que se requiera adquirir para su estudio, a este proceso de adquisición y análisis de parámetros se lo conoce como Monitoreo de Salud Estructural (SHM Structural Health Monitoring). De tal manera que se pueda detectar a tiempo potenciales daños en la estructura, estimando así el nivel de salud estructural. Sistemas como los de monitoreo de salud estructural son métodos utilizados para verificar el estado de la seguridad, integridad y rendimiento de una estructura civil a través de la colocación de diversos medidores en la estructura.

Mediante la utilización de sensores se puede detectar la existencia y ubicación de los daños que se hayan podido generar a causa de las vibraciones provocadas por el flujo vehicular, de transeúntes o por movimientos inesperados debido a sismos u otro fenómeno natural. Si un edificio, puente, túnel no es monitoreado correctamente es posible encontrarnos con problemas graves que solo se manifiestan a nuestros ojos cuando la situación es excesivamente crítica, y por lo tanto de solución mucho más costosa. Gracias al monitoreo estructural se ha logrado extender el tiempo de vida útil de estas edificaciones, disminuyendo así también los costes por reparaciones y mantenimiento.

En este documento se presenta una solución tecnológica ante el incierto comportamiento estructural de los puentes, mediante una red WSN compuesta por un pequeño número de nodos que se comunican entre sí por señales de radio, con la finalidad de monitorizar y entender el comportamiento estructural de los puentes de hormigón al estar sometidos a una carga, obteniendo información desde los nodos terminales desplegados para transmitirla hacia un nodo central de coordinación donde son almacenados, para posteriormente analizarlos y determinar posibles eventos que puedan afectar la salud estructural del puente.

## **1.2 Justificación**

Las edificaciones de estructuras de ingeniería civil en el mundo han aumentado de una manera inexorable, asimismo se han vuelto más demandantes en cuestión de resistencia. Como, grandes puentes, túneles extensos, redes de oleoductos o tuberías sumamente seguras para el transporte de materiales de diferentes tipos. Todos basados en los avances de los materiales, tecnologías y requerimientos necesarios para cubrir los actuales métodos sofisticados de construcción y los tipos de diseños. Si un edificio, puente, túnel o monumento histórico no es

monitoreado correctamente podemos encontrarnos con problemas graves que solo se manifiestan a nuestros ojos cuando la situación es excesivamente crítica, y de soluciones mucho más costosas. Gracias al monitoreo estructural podemos cuidar las estructuras a largo plazo, disminuyendo así también los costes por reparaciones y mantenimiento. Este tipo de estructuras soportan un aumento exponencial de cargas directas, impactos o cargas ambientales aplicadas. Por esta razón, es indispensable tener un análisis estructural de su diseño. Con esto, se podrá detectar de forma temprana algún tipo de falla y garantizar la seguridad e integridad de la estructura.

En América Latina existen diversas tecnologías para el análisis de estructuras civiles, sin embargo, muchas industrias se dedican a realizar pruebas o estudios superficiales con un bajo nivel de confianza para estimar el estado y vida útil de una estructura. Además, el monitoreo de salud estructural conlleva la detección de los diferentes tipos de anomalías, por medio de sistemas modernos en cuestión tecnológica capaces de brindar soluciones oportunas que sean confiables y de calidad, optimizando el mantenimiento y reduciendo los costos operativos.

El Ecuador al ser un país geográficamente irregular, posee un sinnúmero de puentes y túneles que conectan las diferentes regiones del territorio nacional. Por este motivo el presente trabajo se centrará en el diseño de un sistema de monitoreo de salud estructural de puentes de hormigón, basado en redes WSN. Para lo cual se empleará sensores inalámbricos encargados de obtener registros de los parámetros de interés que involucran el comportamiento estructural del puente, para posteriormente ser analizados y estudiados por los encargados del mantenimiento y conservación de dichas construcciones.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

- Desarrollar un sistema para la monitorización de la integridad estructural, seguridad y rendimiento en los puentes de hormigón.

### **1.2.2 Específicos**

- Diseñar una red WSN adecuada para la monitorización del estado estructural de los puentes de hormigón.
- Implementar la red WSN adecuada para la monitorización del estado estructural de los puentes de hormigón.
- Evaluar los datos obtenidos por la red WSN.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

En la actualidad y con el avance de la tecnología se han ido desarrollado redes de sensores cada vez más versátiles de bajos costos, menor tamaño y un bajo consumo de energía, además de la disponibilidad de comunicarse inalámbricamente. Estas redes conocidas como WSN poseen grandes características en cuanto a su desempeño en el entorno, gracias a su amplia distribución, tamaño reducido, escalabilidad, adaptabilidad y la capacidad de tolerar fallos en sus nodos. Las redes de sensores inalámbricas no tienen necesidad de alguna infraestructura, sus topologías son adaptables según la necesidad; son una tecnología novedosa en pleno desarrollo y evolución que requiere grandes investigaciones para su aplicación en un futuro.

Salazar y Mejía (2019) en su proyecto titulado “Diseño e implementación de un prototipo para el análisis de salud estructural de un puente a través de una red de sensores inalámbricos utilizando el software Matlab” plantea una solución eficaz, sencilla y sin altos costos de implementación, usando una red WSN para el monitoreo de salud estructural del puente.

La red de Salazar y Mejía (2019) implementa tres sensores SW -420 ubicados sobre la estructura a analizar los cuales están encargados de detectar las vibraciones, para posteriormente estos datos ser transmitidos por medio de dispositivos XBee hacia un módulo Arduino Uno donde son recopilados gracias a su gran capacidad de almacenamiento y adaptabilidad. Esta comunicación inalámbrica se desarrolló en base estándar 802.15.4 usado para crear redes punto a punto con una baja latencia y gran sincronización de la información. Información que fue almacenada en una base de datos SQLite usando lenguaje de programación Python y a través del programa de Matlab entrego resultados comparativos que determinaban el tipo de daño de la estructura.



Cárdenas, W (2020) en su proyecto titulado “Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un Sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab” desarrollan un prototipo basándose en una red de sensores inalámbricos que consta de cuatro nodos, dos principales y dos secundarios. Su construcción y comunicación inalámbrica se basó en las normas IEEE 802.15.4. y 1451.5. La red está compuesta por un módulo Arduino nano encargado del almacenamiento de los datos recolectados por el sensor de vibración SW-420 para posteriormente almacenarlos en una base de datos SQLite y procesarlos con la ayuda del lenguaje de programación Python y Matlab para su análisis comparativo mediante gráficas establecidas en estándares internacionales.

Sepúlveda, D (2020) en su trabajo llamado “Sistema de monitoreo, basado en redes de sensores inalámbricos, para la medición de variables de interés aplicado a la arquitectura bioclimática” propone una solución tecnológica inalámbrica para la recolección y caracterización de variables medioambientales en recintos.

El proyecto de Sepúlveda, D (2020) implementa una red inalámbrica de sensores WSN que realizan el monitoreo de variables medioambientales como temperaturas, humedades, radiaciones vientos y lluvias, obteniendo datos que posteriormente serán analizados, modelados y expuestos para su evaluación. La comunicación de los nodos de sensores se realizó mediante tecnología GSM y WiFi. Este sistema fue implementado en el Edificio Fray Angélico que consta de 4 fachadas y cubierta, de la Universidad Santo Tomás- Bucaramanga, en donde se distribuyó los sensores según la topología planteada. Para posteriormente visualizar la información en las plataformas Web de los equipos utilizados.

Arguero, J (2020) en su investigación denominada “Desarrollo de una red de sensores inalámbricos con comunicación Zigbee para el monitoreo de una estación didáctica” diseña una red WSN enfocada a la simulación y familiarización de la tecnología

ZigBee en un entorno domótico (acceso de control, temperatura y lúmenes de la habitación). Esta solución presenta una red WSN formada por cuatro nodos XBeeS2: un nodo coordinador y tres nodos sensores, con una topología física tipo estrella donde cada nodo sensor se conecta al nodo coordinador inalámbricamente con una frecuencia de operación a 2.4GHz. Para posteriormente conectarse a un módulo Raspberry para la recopilación y visualización de la información a través de la plataforma Ubidots.

Barrio y Fajardo (2020) en su trabajo llamado “Diseño e implementación de un prototipo de red de sensores inalámbricos WSN para controlar la temperatura en ambientes industriales” propusieron una solución versátil capaz de adaptarse a cualquier ambiente industrial. Mediante simulaciones se logró obtener los diferentes escenarios que se pueden presentar en una industria camaronera, La red WSN compuesta por tarjetas Node MCU8266, las cuales se comunican con la plataforma Cayenne vía web y con la aplicación móvil mostrando resultados en tiempo real, informes y alertas, mostrando el cambio de resultados según varían las temperaturas en los diferentes ambientes.

El tema propuesto tiene como finalidad monitorear la salud estructural de un puente de hormigón utilizando una red WSN, la cual está encargada de medir las vibraciones que se generan sobre la estructura, ya sea debido al tráfico vehicular, peatonal, por algún evento natural o ambiental. Para posteriormente transmitir los datos inalámbricamente hacia el nodo coordinador, el cual es el encargado de recolectar las lecturas obtenidas por los nodos ubicados en el puente y compartirlos con la estación base, en donde se analizará y evaluará los resultados de las mediciones obtenidas por los sensores. Estimando el estado de salud estructural del puente en base a los rangos y normas establecidas internacionalmente para que este tipo de estructuras puedan soportar y mantener su integridad ante la exposición a diferentes tipos de agentes externos.

## 2.2 MARCO TEÓRICO

### 2.2.1 Tipo de Puentes

Un puente es una construcción que permite corregir una falla geográfica como un río, un valle o un cañón. La forma y dimensión de la estructura varía dependiendo de su función y del terreno en el cual se va a levantar la obra. Con el avance de la ingeniería estructural se han aplicado un sinnúmero de diseños, cada vez más robustos y de mejor calidad garantizando la vida útil del mismo, gracias a los materiales y equipos que día a día van mejorando su calidad de trabajo y desempeño. Existen cinco tipos principales de puentes que son : puentes de viga, de ménsula, en arco, colgantes y atirantados.

#### 2.2.1.1 Puentes Tipo Viga

Es el tipo de puente más común y sencillo utilizado en la ingeniería civil. Es una opción sumamente robusta y efectiva por ejemplo en carreteras, su estructura está construida con vigas y hormigón armado, aunque muchos de sus diseños no se enfoquen en la parte visual, han sido una de las opciones más utilizadas en el mundo.



**Figura 2.1:** Puente de viga [1]

**Fuente:** (ACHS, 2014)

### 2.2.1.2 Puente Tipo Ménsula

Este tipo de puentes están compuestos por una estructura, que sobresale de un plano vertical de la cual una o más vigas cumplen la función de ménsula. Además, el número de ménsula para este puente se calcula dependiendo de su tamaño.



**Figura 2. 2:** Puente de ménsula

**Fuente:** (ACHS, 2014)

### 2.2.1.3 Puente Tipo Arco

Caracterizados por tener una forma curva, son por naturaleza muy resistentes y sólidos. Estos puentes cuentan con apoyos ubicados en los extremos de la luz a soportar, entre los que se levanta una estructura en forma de arco para la transferencia de cargas.



**Figura 2.3:** Puente de arco

**Fuente:** (ACHS, 2014)

#### **2.2.1.4 Puente Colgante**

Poseen una estructura sumamente segura gracias a su forma, se encuentran sujetos a una serie de cables de acero para transferir peso desde cualquier parte del puente, sobre la parte superior de las torres, hasta los puntos de amarre en cada borde del puente, además su mecanismo funciona a tracción lo cual evita la flexibilidad o movimiento. Sus diseños están considerados como los más seguros, además de ser una magnífica atracción visual.



**Figura 2.4:** Puente colgante

**Fuente:** (ACHS, 2014)

#### **2.2.1.5 Puente Atirantado**

Es un puente cuya estructura horizontal está suspendida de uno o varios pilares centrales mediante obenques. Se diferencia de los puentes colgantes porque en estos los cables principales se colocan de pila a pila, sosteniéndolo por medio cables secundarios verticales, combinando fuerzas de tracción y de compresión. Obteniendo un equilibrio capaz de mantener estable toda la estructura del puente.



**Figura 2.5:** Puente atirantado

**Fuente:** (ACHS, 2014)

### **2.2.2 Clasificación de Puentes**

Existe una gran variedad de puentes o edificaciones que se levantan en el mundo para comunicar diversos lugares que se encuentran separados geográficamente entre sí, permitiendo la movilización del tráfico vehicular, peatonal, etc. Dependiendo el sitio en donde se vaya a levantar estas estructuras, se presentan algunas diferencias tanto físicas como estructurales en su diseño con el fin de cubrir las exigencias y normas establecidas para este tipo de construcciones. Además de los tipos de puentes más comunes que se encuentran en el mundo ya mencionados anteriormente, también existen diferentes tipos, ya sea en base a los materiales utilizados, su propósito, extensión y durabilidad. Los cuales se permiten catalogar de la siguiente manera como se muestra en la tabla 2.2.2.1.

**Tabla 2.2.2.1:** Clasificación de los Puentes

<b>Clasificación de Puentes</b>	
Longitud	< de 10m Alcantarillas De 10 a 20m Puentes menores De 20 a 70m Puentes medianos > de 70m Puentes mayores
Utilización	Puentes peatonales o pasarelas. Viaductos para carreteras. Puentes de ferrocarriles Puentes para canales o acueductos Puentes grúas
Materiales Usados	Madera Acero Hormigón Armado Hormigón pre y pos tensado. Mampostería. Mixtos.
Objetivo	Puentes Rurales Puentes Urbanos Puentes Provisorios. Puentes Militares.
Trazado	Avigeados. Pasos Superiores Pasos Inferiores. En Curva.
Tipo de Fundición	Puentes flotantes o de pontones. Puentes de fundición directa. Puentes de fundición indirecta. Puentes con cámara neumática.

**Fuente:** (ACHS, 2014)

### 2.2.3 Factores capaces de desencadenar el colapso estructural y sus causas.

En la tabla 2.2.2 se muestra algunos de los factores capaces de desencadenar el denominado colapso de una estructura, identificando sus potenciales causas y el porcentaje de daño causado a la misma.

**Tabla 2.2.2.2:** Factores que implican el colapso de una estructura

<b>Factores que desencadenan el colapso estructural</b>	<b>Clasificación de las causas de un colapso en una estructura.</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Caída completa de la estructura.</li><li>• Colapso de la estructura</li><li>• Deterioro permanente de la estructura.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mal diseño</li><li>• Construcción defectuosa</li><li>• Fallas en los cimientos</li><li>• Cargas extraordinarias</li></ul>

**Fuente:** ACHS (2014)

### 2.2.4 Sistema de monitoreo de salud estructural en puentes

El empleo de sistemas de monitoreo de salud estructural permanentes en puentes ha ayudado a reducir los costos operativos de inspecciones y mantenimientos, proyectando una vida útil según su tipo y de diseño. Estos sistemas cuentan con sensores diseñados para analizar los parámetros físicos y químicos de las formas de deterioro más importantes, como son la corrosión de armaduras de puentes, carbonatación del concreto (temperatura, humedad y pH del concreto, medidos en la superficie de la estructura y a través del espesor del concreto) , ciclos de congelación-descongelación, reacción álcali-sílice y daños mecánicos, así como los comportamientos de las estructuras y su seguridad, como son las deformaciones, deflexiones, grietas y vibraciones (frecuencias, amplitudes, aceleraciones y modos de vibración).



En general un sistema SHM es capaz de determinar y evaluar la funcionalidad, la seguridad de la estructura y su integridad a largo plazo, evaluando los daños en cinco niveles principales.

- Nivel I: Detección e identificación del daño ocurrido
- Nivel II: Identificación y determinación de la ubicación del daño
- Nivel III: Tipificación del daño, mediante la identificación, ubicación y estimación el tipo de daño ocurrido
- Nivel IV: Tamaño del daño, identificando y estimando el tipo daño ocurrido, su ubicación, y evaluación de la gravedad del daño
- Nivel V: Superficie del daño, identificación del daño ocurrido, su ubicación, tipo de daño, gravedad del daño y estado de vida útil del puente.

### **2.2.5 Análisis de Daños en Puentes**

Los daños causados en una estructura pueden ser provocados por cargas accidentales que sobrepasen los límites establecidos en su diseño [2], también pueden presentar daños en algún tipo de estructura debido a que ha cumplido con su vida útil por ende sus propiedades físicas y mecánicas, presentan nuevos cambios. Por esta razón los investigadores e ingenieros se han visto en la necesidad de desarrollar sistemas que permitan el Monitoreo de Salud Estructural (SHM), mediante la combinación del análisis de los datos de la estructura con diferentes variables físicas y ambientales, siendo estos métodos de investigación una solución confiable y económica para la estimación del estado y condición que presenta una estructura.

#### **2.2.5.1 Defecto por deformación elástica.**

Es un defecto que se presenta en una estructura cuando poseen materiales alterables en su composición, considerando ciertos cambios en sus dimensiones producidas por las cargas aplicadas. Estos materiales reaccionan elásticamente cuando están sometidas a ciertas fuerzas de pequeña proporción y recuperando su forma original después de la descarga de esta distorsión.

#### **2.2.5.2 Defecto por deformación inelástica.**

Se presenta al momento que algún componente de la estructura, al ser aplicada una fuerza excesiva, sobrepasando el límite que soporta la propiedad elástica del material, se provoca deformaciones permanentes en la estructura.

#### **2.2.5.3 Defecto por pandeo.**

Es un defecto común provocado por las cargas de compresión, que se presentan tensiones que producen deflexiones adyacentes e inestabilidad en la estructura que posteriormente al existir flexión genera más imperfecciones, siendo un efecto catastrófico ante la presencia del pandeo.

#### **2.2.5.4 Defecto por fatiga.**

Este defecto se produce cuando una estructura está sometida a cargas constantes, dando origen a la aparición progresiva de grietas hasta llegar al deterioro de los materiales.

#### **2.2.5.5 Defecto por fluencia.**

Se presenta cuando uno de los componentes de la estructura está soportando cargas estáticas en lapsos de tiempo prolongados.

#### **2.2.5.6 Defectos por deterioro metálico y químico.**

Es el deterioro por corrosión del material por incursión química, “es un transcurso crecidamente ligado con el lapso que depende de las particularidades del material y del medio ambiente” (ASM, 1998).

#### **2.2.5.7 Defecto por fractura.**

Es un efecto drástico provocado por la presencia de una ruptura en una o varias partes de la estructura del puente, en la mayor parte de ocasiones que se produce este efecto se debe a una sobrecarga o por la preexistencia de grietas o fisuras en su estructura.

### **2.2.6 Reacciones y esfuerzos**

En el medio que nos rodea todo elemento está sometido a fuerzas externas las cuales nos atraen, ejercen presión o actúan de alguna manera sobre nuestro cuerpo, como el viento, la fuerza de gravedad o la atracción de la tierra.

### **2.2.6.1 Acciones**

Una acción es un conjunto de fuerzas que se ejercen sobre algún elemento que presenta resistencia. Dicha resistencia se debe a que, al ser utilizado para construir algún producto derivado del mismo, este deberá soportar no solo su propio peso, sino, además el peso de otros agentes externos. Se clasifican en acciones directas como el peso de su estructura, el viento, los sismos, algún impacto o tipo de explosión, y en acciones indirectas como las variaciones térmicas debido a la temperatura.

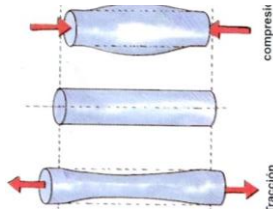
### **2.2.6.2 Reacciones**

Toda acción genera una reacción. Cuando se realiza una acción, existe un grupo de fuerzas de oposición ante la misma, de existir una igualdad entre la acción y la reacción, se lo conoce como equilibrio estático. Contrario al momento en que una de las dos sea mayor perderá su equilibrio y se encontrará en un equilibrio dinámico.

### **2.2.6.3 Esfuerzos**

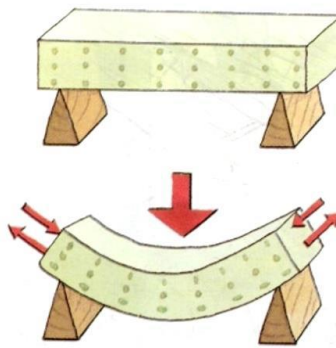
Cuando se presentan varias acciones sobre un elemento, se ha definido que estos eventos generan esfuerzos determinados, los cuales son capaces de presentarse simultáneamente sobre la estructura. En un puente se presentan varios tipos de

esfuerzos como son: los de compresión cuando existen dos fuerzas tratando de reducir la longitud del elemento, generando una compresión, como se aprecia en la figura 2.6, los esfuerzos de tracción cuando dos fuerzas de sentido contrario respectivamente dirigidas hacia el exterior tratan de estirar al elemento como los tensores de los puentes colgantes, esfuerzos de flexión cuando existen fuerzas de tracción y de compresión sobre las caras opuestas del elemento como se observa en la figura 2.7 y el esfuerzo por torsión cuando sobre un cuerpo actúan fuerzas iguales, de igual dirección pero de sentido contrario como se aprecia en la figura 2.8.



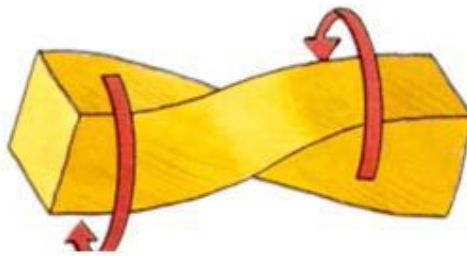
**Figura 2.6:** Esfuerzo de tracción y compresión.

**Fuente:** AISC, Manual of Steel Construction ,Chicago 1994.



**Figura 2.7:** Esfuerzo de flexión

**Fuente:** AISC, Manual of Steel Construction ,Chicago 1994.



**Figura 2.8:** Torsión.

**Fuente:** AISC, Manual of Steel Construction ,Chicago 1994.

### 2.2.7 Cargas estructurales

En el transcurso del diseño de la estructura de un puente, se deben analizar las diferentes condiciones o cargas a las que estará sometida durante su tiempo de vida

útil, tomando en cuenta todas las cargas presentes, que, aunque de mínima proporción podría generar grandes complicaciones en la estructura a largo plazo. Por ejemplo, los vientos fuertes, altos niveles de temperatura etc.

### 2.2.7.1 Cargas muertas (D)

Son cargas que están siempre presentes en la estructura de un puente. Abarcan todos los elementos que forman parte de la composición de la misma, como son las vigas, la calzada y viguetas. Conocidas también como cargas permanentes, siendo la principal carga muerta el peso mismo de la estructura en sí, sus valores se los puede obtener considerando los pesos específicos de los materiales empleados en la construcción de la estructura y su volumen como se puede apreciar en la tabla 2.2.5.3 [2] donde se indican los pesos específicos de algunos materiales en  $\frac{KN}{m^3}$ ; así como su densidad en  $\frac{KN}{m^3}$ . [2]

**Tabla 2.2.7.3:** Pesos y Densidades de los Materiales

<b>MATERIAL</b>	<b>Peso Especifico</b>	<b>Densidad</b>
Concreto simple	23 kN/m <sup>3</sup>	2300 Kg/m <sup>3</sup>
Concreto reforzado	24 kN/m <sup>3</sup>	2400 Kg/m <sup>3</sup>
Mampostería de ladrillo	18 kN/m <sup>3</sup>	1800 Kg/m <sup>3</sup>
Acero	78 kN/m <sup>3</sup>	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Madera Laminada	6 kN/m <sup>3</sup>	600 Kg/m <sup>3</sup>
Madera, densa, seca	7,5 kN/m <sup>3</sup>	750 Kg/m <sup>3</sup>
Arena, grava, tierra suelta	16 kN/m <sup>3</sup>	1600 Kg/m <sup>3</sup>
Arena, grava compactada	19 kN/m <sup>3</sup>	1900 Kg/m <sup>3</sup>
Mampostería de piedra	27 kN/m <sup>3</sup>	2700 Kg/m <sup>3</sup>
Pisos de baldosa de cemento	1,0 kN/m <sup>2</sup>	100 kgf/m <sup>2</sup>
Entrepisos de madera	1,2 kN/m <sup>2</sup>	120 kgf/m <sup>2</sup>
Cielorrasos de madera	0,1 a 0,5 kN/m <sup>2</sup>	10 a 50 kgf/m <sup>2</sup>

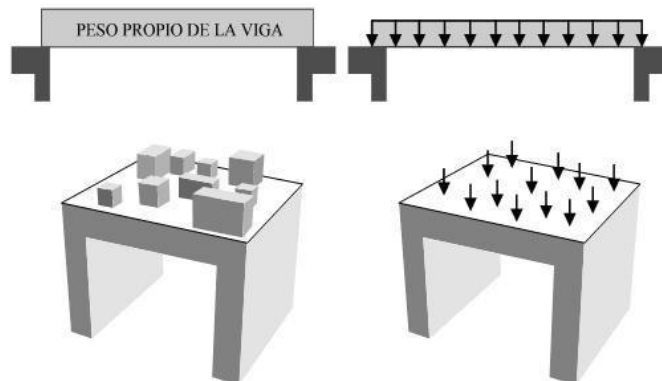
**Fuente:** McCormac, Diseño de Estructuras Metálicas, 1999.

Este tipo de carga depende exclusivamente de las dimensiones de los componentes de la estructura, las cuales deben estimarse durante el proceso de construcción hasta llegar a tener los valores reales, siendo necesario en muchos casos calcular nuevamente el peso de la estructura según los cambios realizados en el diseño. Esta fuerza puntual ejerce sobre un punto específico mientras las fuerzas distribuidas se dividen sobre un área determinada como se observa en la figura 2.2.5.9 las diferentes fuerzas y también la carga muerta de la estructura.

**Tabla 2.2.7.4:** Propiedades de los materiales del Puente

CONCRETO	
Elemento	$f_c$ [MPa]
Viga	35
Losa	21
ACERO DE PRE-ESFUERZO	
$f_{pu}$ [MPa]	1890
$f_{py}$ [MPa]	1600

**Fuente:** McCormac, Diseño de Estructuras Metálicas, 1999.



**Figura 2.2.7.9:** Fuerzas distribuidas y peso sobre una placa o losa.

**Fuente:** McCormac, Diseño de Estructuras Metálicas, 1999.

**Tabla 2.2.7.5** Rango de Luces permitidas Según el tipo de estructura

<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Material</b>	<b>Rango de luces(m)</b>
Losa	Concreto Armado	0-12
	Concreto Prees forzado	10-40
Vigas	Concreto Armado	12-25
	Concreto Prees forzado	25-235
	Acero	30-300
Arco	Concreto	80-390
	Acero	130-400
	Acero Ret.	240-520
Reticulado	Acero	100-600
Atirantado	Concreto	50-450
	Acero	100-1000
Colgante	Acero	300-2000

**Fuente:** McCormac, Diseño de Estructuras Metálicas, 1999.

### **2.2.7.2 Cargas Vivas**

También conocidas como cargas móviles, este tipo de cargas corresponden aquellas que son capaces de variar tanto su magnitud como su ubicación. Estas cargas se mueven debido a su fuerza o impulso propio, en este grupo se encuentran las cargas correspondientes a todo tipo de vehículo ya sea pesado o liviano incluyendo el peso de sus ocupantes, además que van a producir una excitación o vibración en la estructura la cual va a ser objeto de nuestro estudio. Estos sucesos se producen durante lapsos cortos de tiempo según la dimensión de la luz del puente. Estas cargas móviles influyen de manera directa para el diseño de la estructura, tomando en cuenta para el análisis de carga total el momento en el que existan gran cantidad de vehículos sobre el puente, por tal motivo en puentes cortos esta presión va a variar dependiendo del tipo de cargas que se encuentren sobre el mismo, por otro lado, en puentes de gran luz esta carga total del tránsito concentrada sobre su estructura se distribuye uniformemente a lo largo de la misma.



**Figura 2.2.7.10.** Cargas vivas de un puente, situación extrema de carga viva.

**Fuente:** (Castro.2014)

Durante el lapso en que un vehículo se desplaza por un puente se generan deflexiones elásticas las cuales varían su magnitud y posición según el avance de la carga, además se presentan vibraciones a causa de las propias irregularidades de la estructura. Cuando un vehículo pasa por un puente se presentan deflexiones elásticas que varían en magnitud y posición según el avance del vehículo; se presentan vibraciones debido a irregularidades de la estructura, las cuales se incrementan debido al efecto de las suspensiones de los vehículos, conocido como “muelleo”, esta magnitud es analizada en base a la luz del puente. Siendo mayor para puentes de corta luz con un valor fijo del 29 - 30% máximo de la carga viva.

**Tabla 2.2.7.6:** Deflexiones para estados límites de carga

<b>Estado Límite de Carga</b>	<b>Configuración</b>	<b>Deflexión [m]</b>
Resistencia I	Solo camión	0.02573
	Camión + carril	0.02782
Evento Extremo I	Solo camión (X)	0.02590
	Camión + carril (X)	0.02649
	Solo camión (Y)	0.02571
	Camión + carril (Y)	0.02631
Servicio III	Solo camión	0.00216
	Camión + carril	0.00312

**Fuente:** McCormac, Diseño de Estructuras Metálicas, 1999.



**Tabla 2.2.7.7:** Esfuerzos máximos para estados límites de carga

<b>Estado Límite de Carga</b>	<b>Configuración</b>	<b>Esfuerzo [Mpa]</b>
Resistencia I	Solo camión	11.0980
	Camión + carril	13.2627
Evento Extremo I	Solo camión (X)	12.7929
	Camión + carril (X)	11.9540
	Solo camión (Y)	12.8504
	Camión + carril (Y)	12.0115
Servicio III	Solo camión	3.93001
	Camión + carril	2.49376

**Fuente:** McCormac, Diseño de Estructuras Metálicas, 1999.

### **2.2.7.3 Cargas de viento (W)**

Este tipo de cargas o explosiones generan presión o en ciertas ocasiones succión sobre las construcciones cuyas superficies se encuentren expuestas al exterior. Esta carga de viento es sumamente importante en el diseño de estructuras muy altas o muy flexibles, como son los puentes colgantes o estructuras que posean una superficie lateral de grandes dimensiones como bodegas o cubiertas. Los factores más influyentes en esta carga son la velocidad y la variación del viento según la altura, la fuerza de las ráfagas, las condiciones de la superficie expuesta y el clima de la región en que se encuentre, siendo más críticas en las zonas costeras donde es más común la formación de ciclones o huracanes los cuales son capaces de generar vientos de 200 KM/H o incluso mayores. Esta fuerza del viento W se la puede calcular del resultado del producto entre la presión generada por el viento y el área lateral de la estructura edificada.

### 2.2.8 Método de vibración experimental en puentes, utilizado para la medición de dicha vibración.

El movimiento u oscilación de las moléculas de un cuerpo se lo conoce como vibración. Estos movimientos vibratorios pueden darse en un puente debido a fallas de fábrica de algún elemento de los que forman parte del puente, o en otros casos debido a problemas en las calibraciones o mediciones al emplear maquinaria pesada. La clasificación de estas vibraciones se divide en dos grupos que son:

- **Vibraciones libres:** denominadas así debido a que aparecen sin haber necesidad de aplicar algún tipo de fuerza externa para generar esta vibración.
- **Vibraciones forzadas:** son aquellas que se generan o presentan una respuesta ante la aplicación de una fuerza exterior sobre la estructura.

### 2.2.9 Normativas usadas para el análisis de vibraciones.

#### 2.2.9.1 Norma Australiana. - (Australia 2187.2)

**Tabla 2.2.9.8:** Norma Australiana (Australia 2187.2)

<b>Criterio de Daño: Norma Australiana 2187.2-1993</b>	
	Velocidad (mm/s)
<b>Zona Industrial</b>	25
<b>Zona Residencial</b>	10
<b>Edificios históricos y edificios y monumentos de valor especial</b>	2

Fuente: (Castro.2014)

#### 2.2.9.2 Norma Británica. - (British Standard 7385)

Esta norma británica expone el grado de vibración que una estructura puede soportar, antes de empezar a presentar algún tipo de daño en su estructura.

**Tabla 2.2.9.9: Norma Británica (British Estándar 7385)**

<b>Criterio de daño: Norma British Standard 7385</b>		
<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Frecuencias Principales (Hz)</b>	
	4-15	>15
<b>Edificaciones comerciales livianos y estructural residenciales livianas y/o no reforzadas</b>	4 Hz a un incremento a 15 Hz	15 Hz a incremento 40 Hz y más
	5 a 40 Hz y superiores	

**Fuente:** (Castro.2014)

### **2.2.9.3 Norma Brasileña - (Brazilian Standard NBR 9653)**

Se refiere a la norma de seguridad de voladura en una distancia menor a 500 metros con respecto a las zonas residenciales.

**Tabla 2.2.9.10: Norma Brasileña (NBR9653)**

<b>Norma Brasileña (NBR9653)</b>			
<b>Frecuencias Principales (Hz)</b>	<b>4 - 15</b>	<b>15 - 40</b>	<b>&gt;40</b>
<b>Velocidades de partícula máxima (mm/s)</b>	15 - 20	20 - 50	50

**Fuente:** (Castro, 2014)

### **2.2.9.4 Norma del Instituto Central de Investigación de Minería y Combustible. (CMRI proposed Indian Standards)**

**Tabla 2.2.9.11: Norma CMRI**

<b>Criterio de daño: Norma CMRI Proposed Indian Standars</b>		
<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Frecuencias Principales (Hz)</b>	
	<b>&lt;24</b>	<b>&gt;24</b>
<b>Edificaciones industriales, estructuras de acero y concreto reforzado</b>	12.5	25.5
<b>Hogares domésticos, interiores de pozos secos, estructuras de construcción con yeso, puentes</b>	5	10
<b>Objetos de importancia histórica, estructuras muy sensibles, con más de 50 años de construcción y con estado de pobre condición</b>	2	5

Fuente: (Castro.20149)

#### 2.2.9.5 Norma de la Dirección General de Seguridad de Minas India. (DGMS India)

El análisis de daño fue propuesto por diferentes disposiciones, de las cuales se puede nombrar la USBM, Indian Standards, DGMS entre las más importantes.

**Tabla 2.2.9.12: Norma DGMS India**

<b>Criterio de daño: Norma DGMS India</b>			
<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Frecuencias Principales (Hz)</b>		
	<b>&lt;8</b>	<b>8-25</b>	<b>&gt;25</b>
<b>(A) Edificios/estructuras que no pertenecen al propietario</b>			
<b>Edificios Industriales</b>	10	20	25
<b>Hogares/estructuras domésticas</b>	5	10	15
<b>Objetos de importancia histórica, estructuras muy sensibles</b>	2	5	10

<b>(B) Edificios y construcciones pertenecientes al propietario con tiempo limitado de la vida</b>			
<b>Edificios Industriales</b>	15	25	50
<b>Hogares/estructuras domésticas</b>	10	15	20

Fuente: (Castro.2014)

#### 2.2.9.6 Norma Alemana - (DIN4150)

La norma alemana DIN 4150 nos proporciona normas para las vibraciones de la estructura en lapsos de tiempo reducidos y de manera estacionaria.

**Tabla 2.2.9.13:** Norma Alemana (DIN4150)

<b>Norma Alemana (DIN4150)</b>			
<b>Tipo de Estructura</b>	Velocidad de partícula máxima en la base		
	< 10 Hz	10 - 50 Hz	50 – 100 Hz
<b>Oficinas públicas y edificios industriales</b>	10	20 - 40	40 - 50
<b>Hogares domésticos y edificios similares</b>	5	5 - 15	15 - 20
<b>Edificio que no entran en la clasificación anterior por su sensibilidad</b>	3	3 - 8	8 - 10

Fuente: (Castro.2014)

#### 2.2.9.7 Norma Neozelandesa. (New Zealand Standard 4403)

Esta norma indica reglas que establecen un solo límite a partir del cual se provoca daño en razón de las vibraciones.

**Tabla 2.2.9.14:** Norma Neozelandesa (NZS 4403)

<b>Norma Neozelandesa (NZS 4403)</b>			
<b>Frecuencias Principales (Hz)</b>	<b>1 - 3</b>	<b>3 - 20</b>	<b>&gt;20</b>
<b>Velocidades de partícula máxima (mm/s)</b>	50	49 - 6	5

Fuente: (Castro, 2014)

### 2.2.9.8 Norma Indonesia - (Indonesian Standard SNI 7571)

Analiza las ventajas de seguridad de volado para trayectos inferiores a 500 metros de zonas residenciales.

**Tabla 2.2.9.15:** Norma Indonesia (SNI7571)

<b>Norma Indonesia (SNI7571)</b>			
<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Velocidad de partícula máxima en la base</b>		
	<b>&lt; 5 Hz</b>	<b>5 - 20 Hz</b>	<b>20 Hz</b>
<b>Edificios industriales</b>	11	20	40
<b>Hogares y marcos de buena estructura</b>	7	11	20
<b>Hogares de mediana estructura con pendiente</b>	5	7	11
<b>Hogares de mala estructura con pendiente</b>	3	5	7

Fuente: (Castro.2014)

### 2.2.9.9 Norma Española - (Criterio de Prevención UNE 22.381)

La norma española utiliza el estudio de las vibraciones producidas por el tráfico, voladuras, las cuales se desplazan por un área determinada. Estas vibraciones

generadas por este tipo de fuentes se las distingue por su mayor amplitud y su alto contenido de frecuencia. Debido a estas razones dichas vibraciones no se las puede registrar o guardar con equipos convencionales como sismómetros, sino que necesitan de equipos de instrumentación dedicados a este tipo de mediciones.

**Tabla 2.2.9.16:** Norma Española (Criterio de Prevención UNE 22.381)

<b>Norma Española (Criterio de Prevención UNE 22.381)</b>			
<b>Tipos de Estructuras</b>	<b>Velocidad de partícula máxima en la base</b>		
	<b>&lt; 15 Hz</b>	<b>15 - 75 Hz</b>	<b>&gt;75 Hz</b>
<b>Edificios industriales</b>	20	20 - 100	100
<b>Hogares domésticos</b>	9	9 - 45	45
<b>Edificios históricos</b>	4	4 - 20	20

Fuente: (Castro, 2014)

#### **2.2.9.10 Norma Suiza - (Swiss Standard SN 640 312a)**

Este conjunto de normas sobre vibraciones es muy reconocido en el mundo entero, siendo tres normas las más importantes para el levantamiento de estructuras, la Mining Swiss, la Piling Swiss y la Traffic Swiss, las que se utilizan para la construcción de los cimientos, carreteras y otros tipos de edificaciones

**Tabla 2.2.9.17:** Norma Suiza (Swiss Standard SN 640 312a)

<b>Norma Suiza (Swiss Standard SN 640 312a)</b>			
<b>Tipos de Estructuras</b>	<b>Velocidad de partícula máxima en la base</b>		
	<b>&lt; 30 Hz</b>	<b>30 - 60 Hz</b>	<b>&gt;60 Hz</b>
<b>Edificios industriales</b>	6	8	11
<b>Hogares domésticos</b>	3	4	6
<b>Edificios históricos</b>	0.5	2	3

Fuente: (Castro, 2014)

### 2.2.9.11 Norma Canadiense. (Toronto 514)

Esta regla permite obtener el monitoreo constante de la vibración y define la máxima vibración permitida para un área determinada de paso.

**Tabla 2.2.9.18:** Norma Canadiense (Toronto514)

<b>Norma Canadiense (Toronto 514)</b>			
<b>Frecuencias Principales (Hz)</b>	<b>&lt; 4</b>	<b>4 - 10</b>	<b>&gt;10</b>
<b>Velocidades de partícula máxima (mm/s)</b>	8	15	25

Fuente: (Castro, 2014)

**Tabla 2.2.9.19:** Rango de frecuencias en relación con tipos de daños

<b>Rango de frecuencias en relación con tipos de daños</b>		
<b>Tipo de daño</b>	<b>Características</b>	<b>Valores Indicativos</b>
<b>Cosmético</b>	Formación de grietas finas, crecimiento en grietas existentes en estuco, paredes delgadas o mortero	< 4Hz
<b>Menor</b>	Formación de grietas largas, pérdida o caída de superficies de estuco, grietas en bloque de concreto y ladrillo	4 – 15 Hz
<b>Estructural</b>	Daño en elementos estructurales	>15 Hz

Fuente: (Group, 2018)



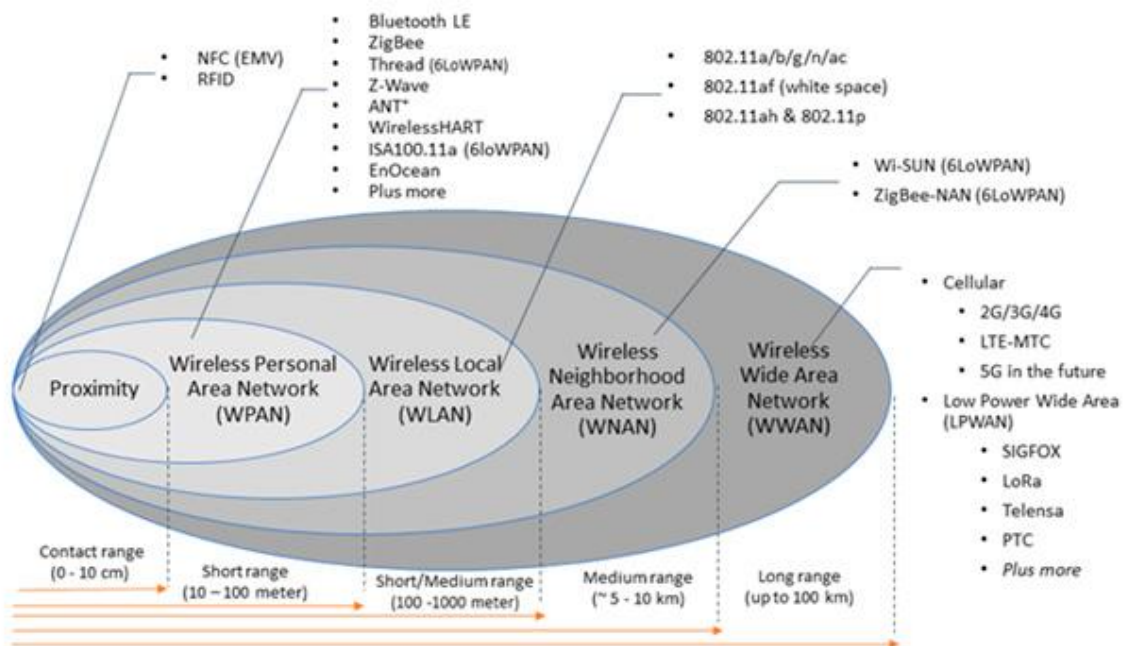
En definitiva, estos dos últimos ítems, como son la norma Canadiense Toronto 514 y la tabla de rango de frecuencias para daños son las referencias más utilizadas y aplicadas en sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes.

### 2.2.10 Redes inalámbricas.

La comunicación dirigida entre un transmisor y un receptor, o entre un transmisor y varios receptores sin la utilización de cables de conexión en medio, se lo conoce como redes inalámbricas. Estas redes han ido evolucionando y desarrollando diferentes tipos de tecnologías, como son Bluetooth, RF, Wifi, Wimax etc.

#### 2.2.10.1 Tipos de redes inalámbricas según su cobertura

La tecnología WLAN a dado paso a la evolución de varias tecnologías inalámbricas, las cuales se clasifican según su alcance y la cobertura que puede alcanzar. La figura 2.2.10.11 podemos observar gran parte del conjunto de tecnologías inalámbricas que se utilizan en el mundo, que vas desde las WPAN redes de área personal hasta las WWAN que son redes de cobertura mundial.



**Figura 2.2.10.11:** Cobertura redes inalámbricas en el mundo

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)

### 2.2.11 Red Inalámbrica de Area Personal (WPAN)

Una red de area personal (WPAN) hace referencia a las redes inalámbricas en áreas de corto alcance, permite la comunicación entre varios dispositivos periféricos con un ordenador principal, sin la necesidad de la conexión por cables. Las WPAN utilizan varios tipos de tecnología para la comunicación, como son:

**Bluetooth:** lanzada en 1994 por Ericsson, bajo el estándar IEEE 802.15.1, permite una velocidad de transferencia de datos máxima de 1Mbps, tiene un alcance de 30 metros, con un bajo consumo de energía siendo la principal tecnología de las WPAN.

**HomeRF (Home Radio Frequency):** creada principalmente por la empresa Home RF Working Group en 1998, es una tecnología empleada para áreas con un alcance de 50 a 100 metros, permite tener una velocidad máxima de 10 Mbps para transmisión de datos.

**Zigbee:** es un grupo de protocolos de alto nivel para comunicación inalámbrica bajo el estándar IEEE.802.15.4, permite la conexión de dispositivos con un coste y consumo de energía muy bajo. Opera en la frecuencia de 2,4 GHz con 16 canales de comunicación a una velocidad de transferencia máxima de 250 Kbps y un alcance máximo de 100 metros. Es muy versátil ya que es capaz de integrarse directamente en diferentes dispositivos electrónicos domésticos y de entretenimiento.

**Infrarrojo (IR):** la tecnología infrarroja se emplea para establecer conexiones inalámbricas en áreas con un radio de pocos metros, con una velocidad de unos pocos Mbps. Este tipo de tecnología es muy utilizada en aparatos electrónicos de uso doméstico, pero presenta cierta interferencia ante las ondas de luz. En la tabla 2.2.11.18 se puede visualizar los diferentes estándares y tecnologías que abarca las redes de area personal (WPAN), así como su velocidad de transferencia de datos y la distancia que puede alcanzar.

**Tabla 2.2.11.20:** Estándares y Tecnologías de las WPAN

WPAN (IEEE)	Technology	Data rate	Distance
IEEE 802.15.1	Bluetooth	1 Mbps	10m (Class 3) 100m (Class 1)
IEEE 802.15.2	Coexistence Mechanisms between WLAN and WPAN		
IEEE 802.15.3	High Rate WPAN (UWB)	22, 33, 44, 55 Mbps	30-50m
IEEE 802.15.3a	Alternate 15.3 PHY	>100 Mbps	10m
IEEE 802.15.4	Low Rate WPAN(ZigBee)	250 Kbps	1-100 m
IEEE 802.15.4a	Low Rate Alternative PHY of 802.15.4 (UWB)	5 Mbps	<1000 m
IEEE 802.15.4b	Revisions and Enhancements IEEE 802.15.4		

**Fuente:** El Investigador

### **2.2.12 Red de sensores inalámbricos (WSN)**

Una red de sensores inalámbricos WSN está compuesta por una gran cantidad de pequeños dispositivos electrónicos móviles, auto direccionados y de bajo consumo eléctrico conocidos como nodos. Los cuales son distribuidos estratégicamente en la red, con el objetivo de recolectar, procesar y transmitir la información hacia el coordinador.

#### **2.2.12.1 Características de una red de sensores inalámbricos (WSN)**

Las redes WSN se enfocaron en un principio para aplicaciones militares, pero gracias al avance tecnológico se han desarrollado componentes de menor tamaño, bajo costo, menor tamaño capaces de comunicarse inalámbricamente, por lo que se ha ido empleando en diferentes sectores como son de salud, movilidad, industria, medio ambiente y muchas otras más. Estas redes WSN poseen gran escalabilidad y una amplia distribución, por lo que una red puede constar de uno, cientos o miles de nodos con capacidad de comunicarse inalámbricamente.

Una de las principales características de una red WSN es que sus topologías son adaptables, es decir que no tienen necesidad de poseer alguna infraestructura, disminuyendo su tamaño y mejorando su capacidad de tolerancia a fallas.

### 2.2.12.1 Elementos y dispositivos que componen una red WSN

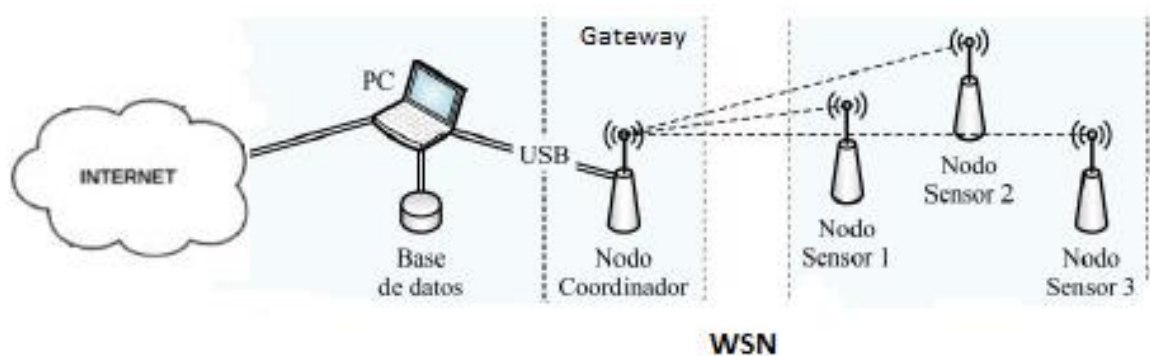
Una red WSN está compuesta por varios elementos en su estructura como son: los nodos sensores o terminales, el nodo coordinador, el Gateway y la estación base.

**Nodo coordinador:** el nodo coordinador de la red es el encargado de recibir las señales provenientes de los nodos terminales, almacenarlos en alguna base de datos o algún disco extraíble para que posteriormente se los pueda enviar al exterior ya sea al usuario o se los cargue en la nube.

**Nodo terminal:** conocidos también como nodos sensores o terminales, posee un transmisor de radio con antena, un microcontrolador, la placa electrónica de interfaz y un suministro de energía que puede ser una fuente o generalmente una batería recargable. Las dimensiones de estos nodos sensores varían según su diseño y el tamaño de sus componentes, logrando operar en entornos que en ocasiones no permiten el acceso humano, llegando a ser un dispositivo inalámbrico sumamente funcional y de bajo consumo de energía para recolectar la información del objetivo o variable a estudiar.

**Gateway:** es el encargado de enlazar la red de datos con la red de sensores inalámbricos.

**Estación Base:** es el lugar en donde está ubicada la red de datos del usuario, aquí se recolecta y almacena los datos obtenidos por los nodos sensores para ser analizados posteriormente. En la figura 2.2.12.12 se puede observar una red WSN con sus elementos distribuidos.



**Figura 2.2.12.12:** Elementos de una Red WSN

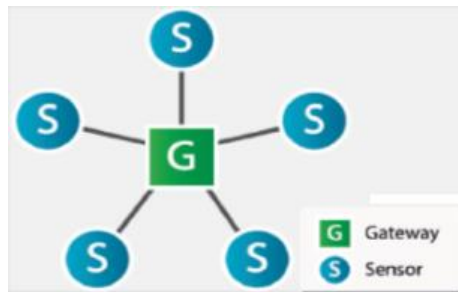
**Fuente:** El Investigador

#### 2.13.4 Topologías de redes de sensores inalámbricas (WSN)

Una red de sensores inalámbricas WSN puede tener diferentes topologías dependiendo de las necesidades del área en que se va a distribuir los nodos, las cuales se describen a continuación:

- **Topología en estrella**

Es una topología en la cual cada nodo terminal se comunica directamente con el Gateway, es una red sencilla, de bajo costo, menor consumo energético y de baja latencia. Es susceptible a generar colisiones.

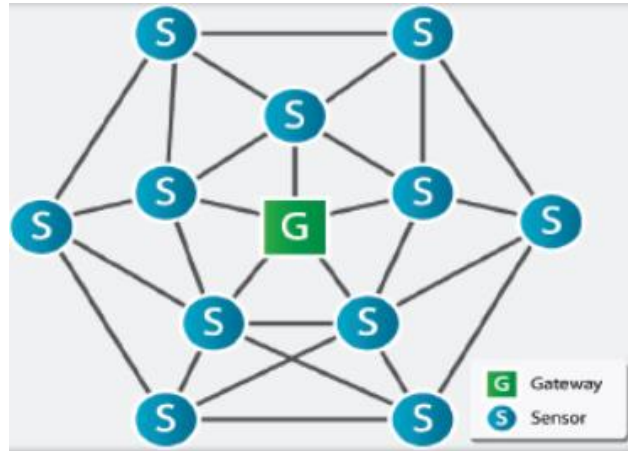


**Figura 2.2.13.13:** Topología Estrella

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)

- **Topología en malla**

La topología en malla permite la comunicación entre nodos, que se encuentren la misma área de transmisión, siempre busca el camino más fiable para llegar al Gateway, se puede tener una gran escalabilidad a un bajo costo, y en caso de fallo es capaz de seguir un camino alternativo. Debido a la complejidad del sistema presenta una alta latencia.

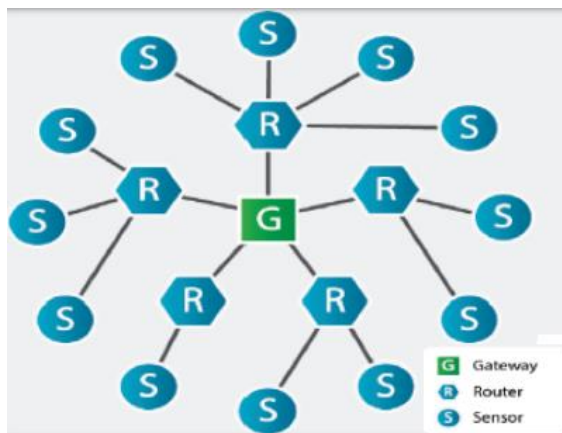


**Figura 2.2.13.14:** Topología malla

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)

### Topología de árbol

En esta topología cada nodo terminal busca comunicarse con un coordinador y así posteriormente poder llegar hasta el Gateway. Posee una alta escalabilidad con bajo riesgo de colisiones. Debido a la mayor cantidad de nodos routers puede llegar a ser una red de alto costo.



**Figura 2.2.13.15:** Topología árbol

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)

#### **2.2.14 Protocolos de comunicación inalámbrica para el estándar 802.15.x.x**

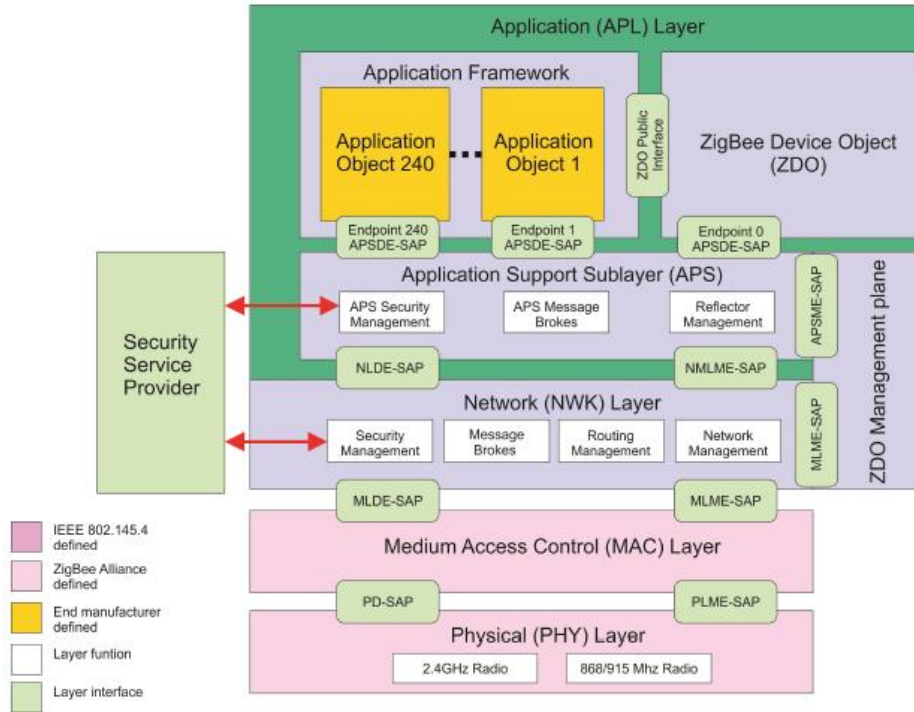
El estándar IEEE 802.15 es el protocolo de comunicación para redes inalámbricas de área personal WPAN, entre dispositivos a corta distancia. De la cual se originan los siguientes estándares de comunicación inalámbrica según la tecnología utilizada:

- IEEE 802.15.1 Bluetooth
- IEEE 802.15.2 Coexistencia
- IEEE 802.15.3 High Rate Wireless Personal Networks (HR-WPAN)
- IEEE 802.15.4 ZigBee

#### **2.2.15 Estándar IEEE 802.15.4 ZigBee**

El estándar de comunicación IEEE 802.15.4 define las tasas de transmisión bajas de 20 a 250 kbps para sistemas a distancias de hasta 100m. La tecnología ZigBee se adaptó a estas especificaciones establecidas, generando una solución inalámbrica de bajo consumo energético. Esta tecnología trabaja en bandas libres o ISM, como son la banda de 868MHz de Europa, la norteamericana de 915MHz y la banda libre de 2.4GHz. Posee una arquitectura basada en el modelo OSI compuesta principalmente por 4 capas con el propósito de simplificar la arquitectura para el diseño de una red, simple, de baja tasa de transmisión y de bajo consumo energético. Las capas inferiores como son, la capa física (PHY) y la de acceso al medio (MAC) están definidas por el protocolo IEEE 802.15.4., siguiendo con la capa de red NWK y al final la de aplicación APL, con una capa interfaz APS entre la capa NWK de red.





**Figura 2.2.15.16:** Arquitectura del Estándar ZigBee [8]

## 2.2.16 Arduino

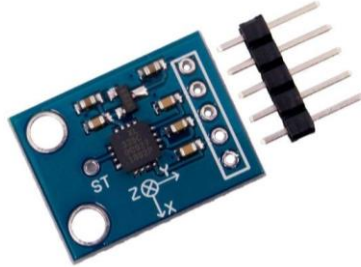
Arduino es una plataforma de desarrollo electrónico basada en software libre tanto para hardware como software. Posee un microcontrolador de fácil reprogramación compuesto por una serie de pines de entradas analógicas y digitales, que permiten establecer una conexión entre los sensores y el controlador de la placa. La misma que es capaz de permitir el acople con placas de expansión, las cuales brindan mas funcionalidades a la placa original. Su microcontrolador posee un oscilador de cristal con un núcleo de 8 bits conocido como AVR, el cual se ejecuta a 16 MHz con una memoria limitada de 2 kilobytes de memoria y 32 kilobytes de almacenamiento. Su entorno de programación utiliza lenguaje C o C++, brindando facilidad de interacción con las diferentes aplicaciones en que se emplea.

### **2.2.16.1 Arduino IDE**

El Arduino IDE es un entorno de programación sencillo que brinda al usuario la capacidad de crear programas de diferentes tipos y cargarlos en la memoria de su microcontrolador. Utiliza un lenguaje sencillo de programar y entender, basado en Processing un tipo de lenguaje para desarrollo en Java. Cuando el usuario haya terminado de escribir sus líneas de programa, el IDE traducirá el código a su lenguaje de ensamble y compilara sus líneas. Posteriormente se carga el programa en el microcontrolador, sin antes pasar por el analizador de código escrito el cual lo verificara antes de empezar la transferencia. Este software posee una gran cantidad de programas listos para ser cargados en el dispositivo y empezar a realizar las pruebas necesarias para descifrar sus aplicaciones. Esta comunicación física se la logra mediante el empleo de cables USB de distintos modelos.

## 2.2.17 HARDWARE UTILIZADO PARA EL DESARROLLO

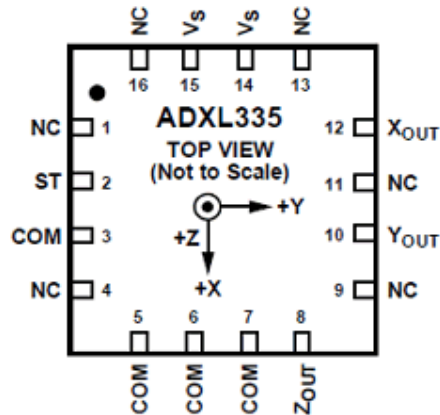
### 2.2.17.1 SENSOR ADXL335



**Figura 2.2.17.16:** Sensor ADXL335

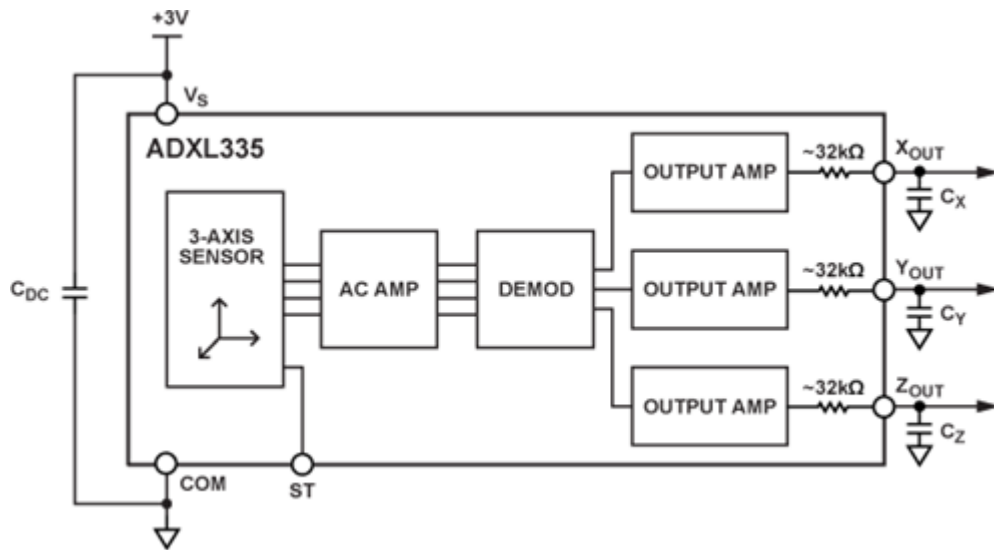
**Fuente:** CAPRILE, S. (2009)

El sensor ADXL335 es un acelerómetro triaxial, capaz de medir las vibraciones o aceleraciones resultantes de un movimiento en las tres coordenadas simultáneamente, es un dispositivo pequeño de baja potencia, pero de grandes prestaciones y aplicaciones en su mayoría en el área de la aviación y la robótica, como son los sistemas de equilibrio y navegación de drones y aviones.



**Figura 2.2.17.17:** Diagrama Pines Sensor ADXL 335

**Fuente:** CAPRILE, S. (2009)



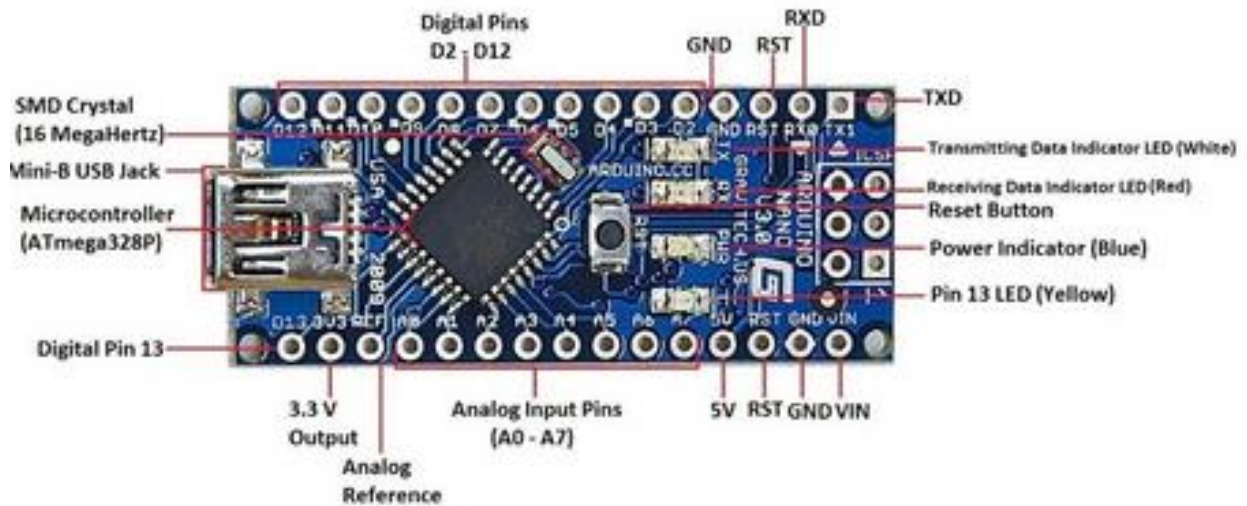
**Figura 2.2.17.18:** Diagrama Esquemático Sensor ADXL 335

**Fuente:** CAPRILE, S. (2009)

El acelerómetro de 3 ejes mide la aceleración dinámica (movimiento, choque o vibración) y la aceleración estática (inclinación o gravedad) en un rango de  $\pm 3$  g con 0.3% de no linealidad y 0.01%/°C de estabilidad de temperatura. Para cada eje devuelve una tensión proporcional a la aceleración, las cuales se pueden convertir a datos digitales con la ayuda de algún microcontrolador PIC, Atmel o Arduino. El voltaje de salida por eje se incrementa linealmente desde 0V (0G) hasta 3.3V (3G).

Para optimizar el ancho de banda del acelerómetro, se lo puede realizar usando los capacitores C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub> y C<sub>Z</sub> en los pines ZOUT, YOUT y XOUT. El ancho de banda de medición puede seleccionarse para adaptarse a cada aplicación desde 0.5 Hz a 1600 Hz para ejes X y Y y desde 0.5 Hz a 550 Hz para el eje z. Funcionando en una sola fuente de 1.8V a 3.6V, el ADXL335 consume 350  $\mu$ A. Opera en ambientes con una temperatura específica desde  $-40^{\circ}$  C a  $+85^{\circ}$  C.

## 2.2.17.2 ARDUINO NANO



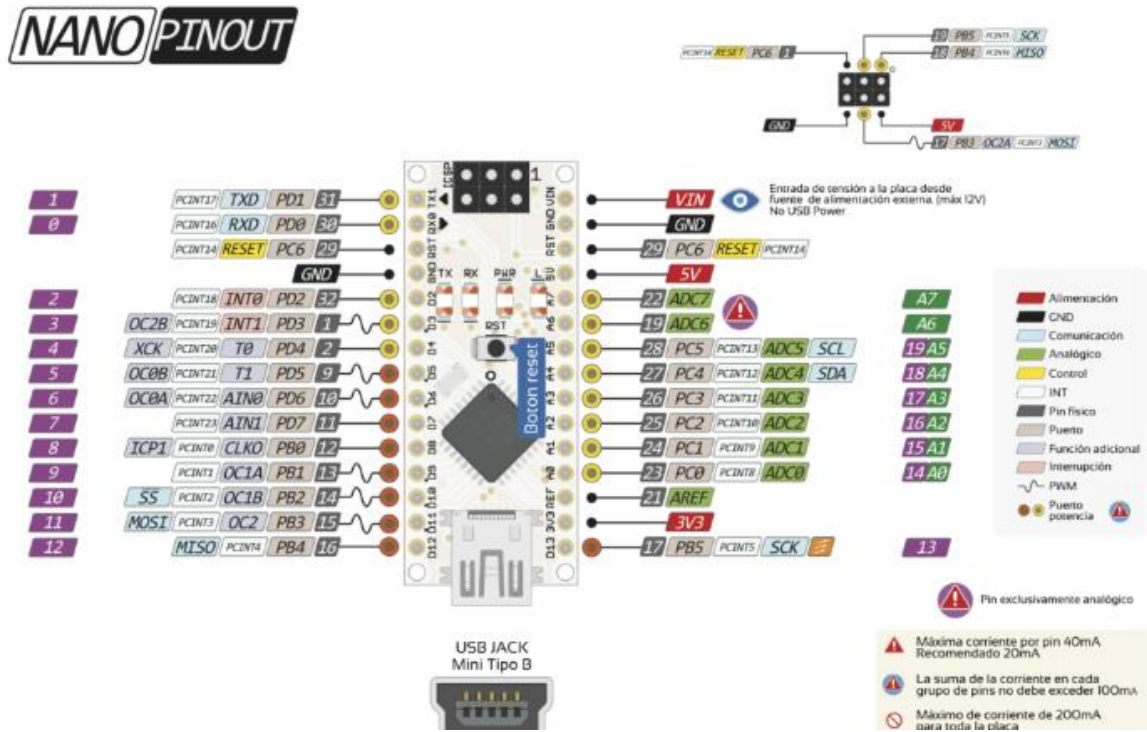
**Figura 2.2.17.19:** Arduino Nano

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)

El módulo Arduino Nano es un dispositivo compacto basado en la tecnología del microcontrolador ATmega328P con un cristal de 16Mhz, posee entradas y salidas tanto digitales como analógicas, puerto para conexión Mini-USB, ICSP y reset.






La selección de este dispositivo se debe a que posee características similares al Arduino Uno, pero de un tamaño más reducido para ser utilizados en lugares y aplicaciones de tamaño pequeño. Aun así, es muy manejable e incluye la circuitería necesaria para programarla a través de un puerto mini-USB, pin de alimentación, pines de entrada y salida, como se observa en la figura 2.2.17.20. Además, dispone

un regulador lineal de menor capacidad de disipación de potencia, comparada con el UNO, como podemos apreciar en la tabla comparativa 2.2.11.19, en donde tenemos las diferentes características de las placas Arduino y de otras marcas de fabricación.



**Figura 2.2.17.20:** Diagrama Esquemático Arduino Nano  
Fuente: Archila, D., Santamaría, F. (2013)

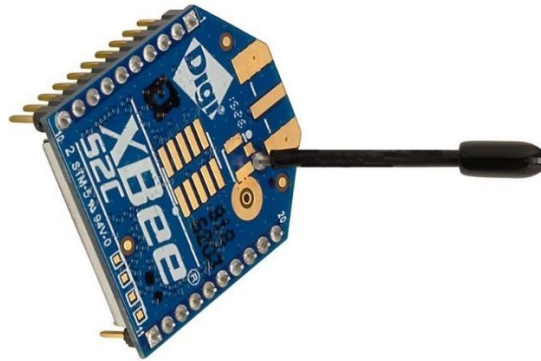
Tabla 2.2.11.19: Tabla Comparativa del Módulo Arduino Nano con otras tarjetas

										
<b>Fabricante</b>	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Netduino	Texas Instruments	Fundación Raspberry Pi
<b>Modelo</b>	Pro Mini	Nano	Uno	Mega / Mega 2560	Leonardo	Micro	Due	Netduino 2	Stellaris Launchpad LM4F120	Raspberry Pi Mod.B
<b>Microcontrolador</b>	AVR Atmega 168 ó 328 8bits	AVR ATmega 168 ó 328 8bits	AVR ATmega 328 8bits	AVR ATmega2560 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	ARM SAM3X8E Cortex-M3 32bits	ARM STMICRO STM32F2 Cortex-M3 32bits	ARM LM4F120H5QR Cortex-M4 32bits	ARM Broadcom BCM2835
<b>Frecuencia</b>	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	84Mhz	120Mhz	80Mhz	700Mhz
<b>Memoria RAM</b>	2KIB	2KIB	2KIB	8KIB	2.5KIB	2.5KIB	96KIB (64+32KIB)	60KIB	32KIB	512MIB
<b>Memoria EEPROM</b>	1KIB	1KIB	1KIB	4KIB	1KIB	1KIB	0	0	-	-
<b>Memoria FLASH</b>	16 ó 32KIB	16 ó 32KIB	32KIB	128 ó 256KIB	32KIB	32KIB	512KIB	192KIB	256KIB	-
<b>Pines digitales entradas/salidas</b>	14/14	14/14	14/14	54/54	20/20	20/20	54/54	20/20	43/43	8/8
<b>Tensión/corriente pines digitales</b>	3.3v ó 5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	3.3v 3~15mA (130mA entre todos)	3.3v~5v 25mA (125mA entre todos)	5v	-
<b>Pines analógicos entradas/salidas</b>	6/0	8/0	6/0	16/0	12/0	12/0	12/2	6/0	-	-
<b>Tensión/resolución pines analógicos</b>	3.3v ó 5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	3.3v 12bits (4096 valores)	5v 12bits (4096 valores)	-	-
<b>Pines con interrupción externa</b>	2	2	2	6	2	2	-	-	-	-
<b>Pines PWM</b>	6	6	6	15	7	7	12	6	-	-
<b>Conexiones Serial / UART</b>	1	1	1	4	1	1	4	4	8	Si
<b>Conexiones I2C / TWI</b>	1	1	1	1	1	1	2	1	4	Si
<b>Conexiones ISP / ICSP</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	-	Si
<b>Conexión USB</b>	No (necesita adaptador externo)	Si	Si, USB-B	Si, USB-B	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, MicroUSB
<b>Conexión USB de depuración</b>	No	No	No	No	No	No	Si, MicroUSB	Si, MicroUSB	Si, MicroUSB	-
<b>Conexión Bluetooth</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	-
<b>Conexión WiFi</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	-
<b>Conexión Ethernet</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
<b>Conexión USB Host</b>	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si	Si
<b>Almacenamiento por SD</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
<b>Corriente en el pin de 5v</b>	-	500mA	500~800mA	500~800mA	500~800mA	500mA	800mA	-	-	-
<b>Corriente en el pin de 3.3v</b>	-	50mA	50mA	50mA	50mA	50mA	800mA	-	-	-
<b>Voltaje de alimentación por el USB</b>	3.3v ó 5v (sin usb)	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v
<b>Voltaje de alimentación recomendado por el Jack</b>	3.35 -12 V (modelo 3.3V) ó 5 - 12 V (modelo 5V)	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7.5~9v	-	-
<b>Voltaje de alimentación limite por el Jack</b>	-	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	-	-	-

Fuente: El Investigador

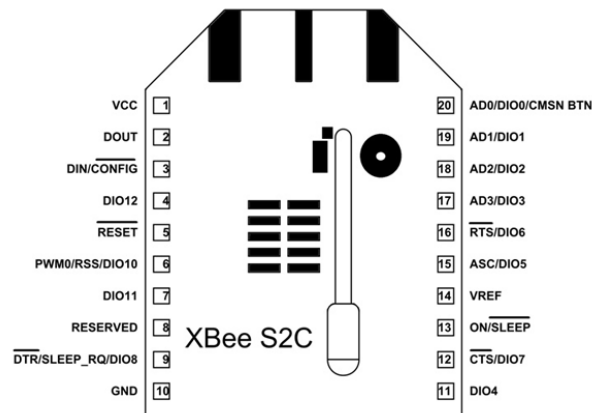
### 2.2.17.3 TRANSMISOR XBEE S2C

El módulo XBee S2C es un dispositivo basado en tecnología ZigBee utilizado para establecer comunicación inalámbrica entre nodos, opera a una frecuencia de 2.4 Ghz para el intercambio de información, es adaptable a cualquier topología de red implementada y brinda una alta velocidad de transmisión a un bajo costo.



**Figura 2.2.17.21:** Transmisor Xbee S2C

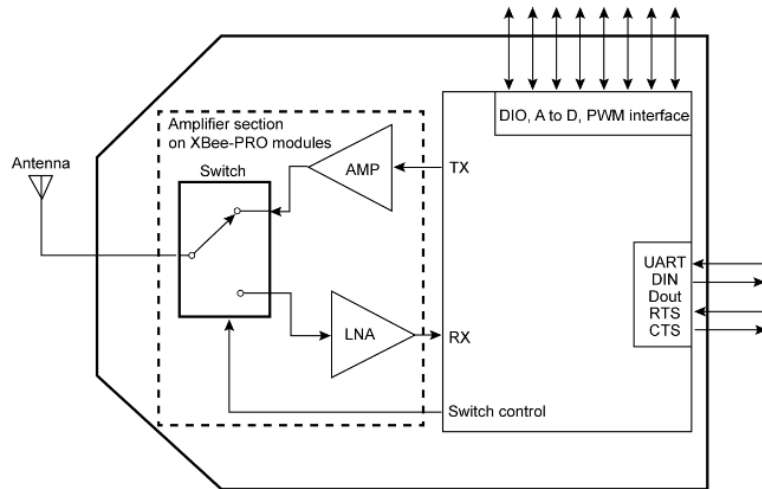
**Fuente:** Avila Pesantez, Diego. (2015)



**Figura 2.2.17.22:** Distribución de Pines Transmisor Xbee S2C

**Fuente:** Avila Pesantez, Diego. (2015)



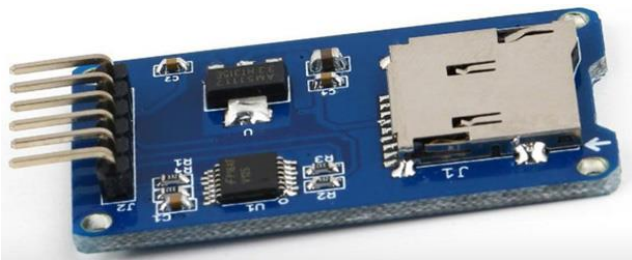


**Figura 2.2.17.22:** Distribución Esquemático Transmisor Xbee S2C

**Fuente:** Avila Pesantez, Diego. (2015)

#### 2.2.17.4 MODULO DE TARJETA SD

Es un dispositivo electrónico que permite almacenar grandes cantidades de datos provenientes de las lecturas periódicas de los nodos terminales.

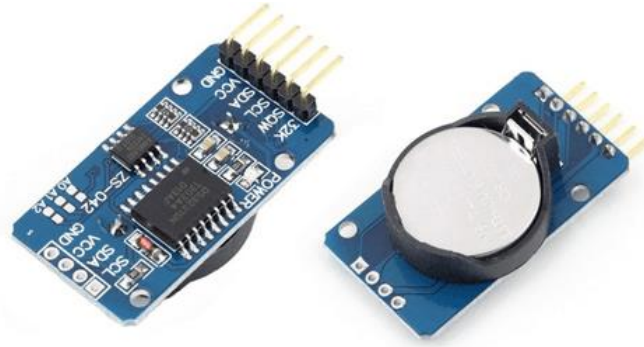


**Figura 2.2.17.23:** Modulo de Tarjeta SD Arduino

**Fuente:** Tipos de Arduino (2015)

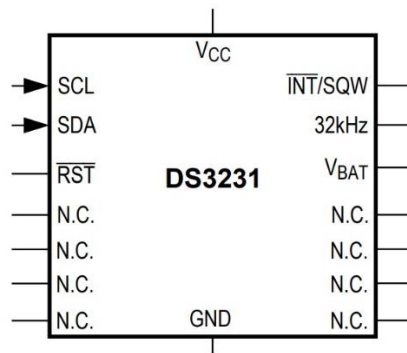
#### 2.2.17.5 MODULO RTC DS3231 RELOJ

El módulo DS3232 es un reloj en tiempo real de alta exactitud y precisión, posee un cristal oscilador con compensación de temperatura integrado en su estructura, asegurando su precisión a largo plazo. Proporciona un registro detallado de la zona horaria, la cual se ajusta automáticamente.



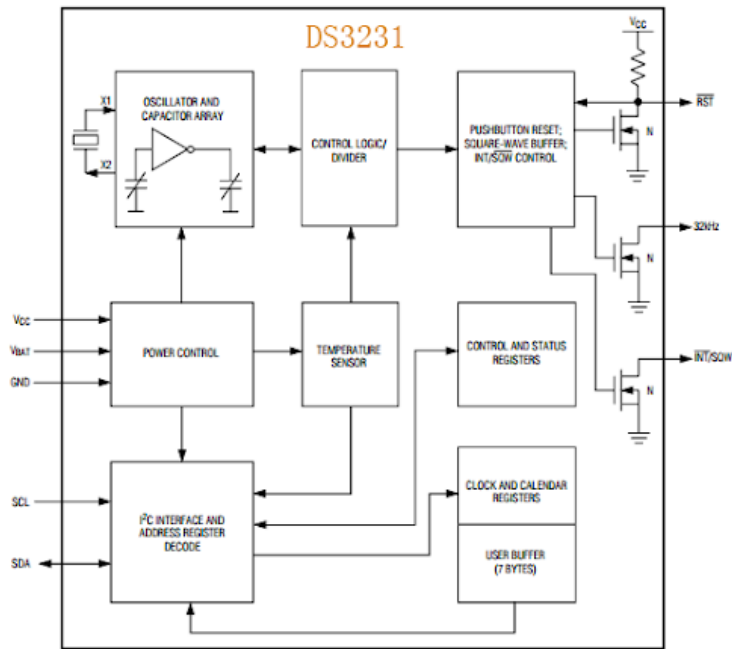
**Figura 2.2.17.24:** Modulo Reloj DS3231Arduino

**Fuente:** Tipos de Arduino (2015)



**Figura 2.2.17.25:** Diagrama de Pines Módulo DS3231Arduino

**Fuente:** Tipos de Arduino (2015)



**Figura 2.2.17.26:** Diagrama Esquemático Módulo DSC3231

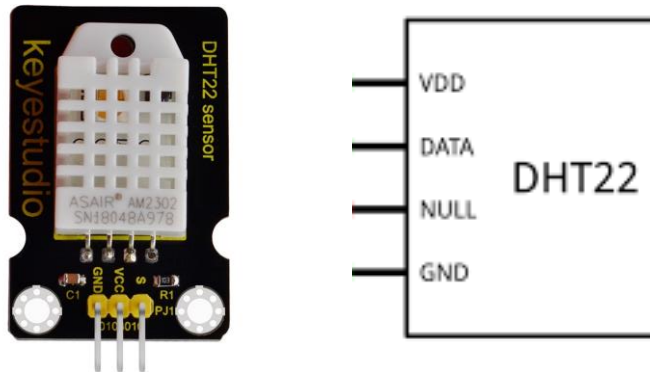
**Fuente:** Tipos de Arduino (2015)

### 2.2.17.6 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DHT 22

El sensor DHT22 es un transductor digital de humedad y temperatura relativa, posee un buen desempeño en trabajo de campo a un bajo costo. Este compuesto por una parte capacitiva encargada de detectar la humedad y medir la temperatura del ambiente analizando el aire que circula por el medio, su calibración viene por defecto de fábrica para tomar lecturas cada dos segundos. Es utilizado en aplicaciones industriales y en ambientes agrícolas entregando una señal digital para ser analizada.

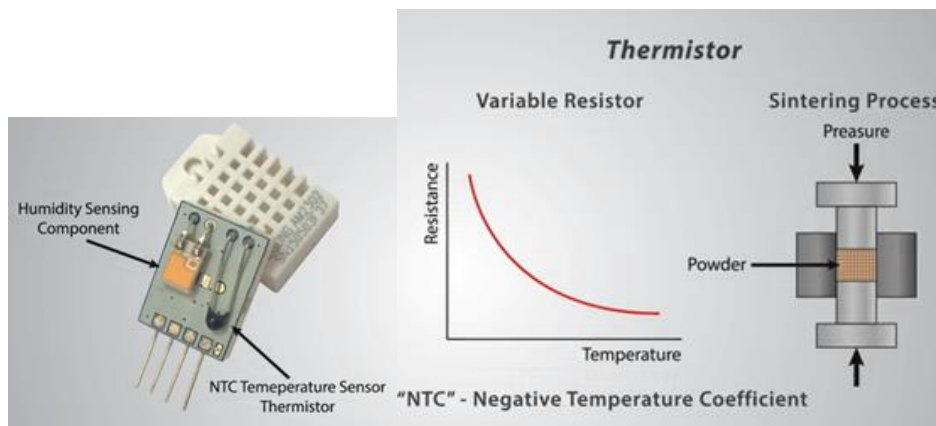
Su hardware y software es compatible con diferentes plataformas tecnológicas como Arduino, Nodemcu y Raspberry Pi, que gracias a sus librerías permiten ser utilizados en una variedad de proyectos gracias a su alta fiabilidad y estabilidad da largo plazo.

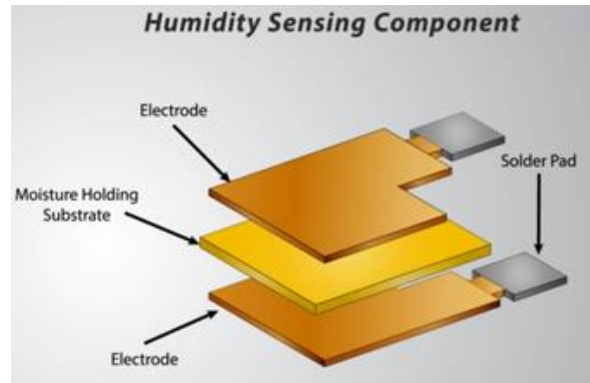
En este caso se utilizará para medir la temperatura y humedad del ambiente para verificar el correcto funcionamiento de los diferentes elementos electrónicos utilizados y controlar si alguno de estos necesita ser reemplazado.



**Figura 2.2.17.27:** SENSOR DHT22

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)



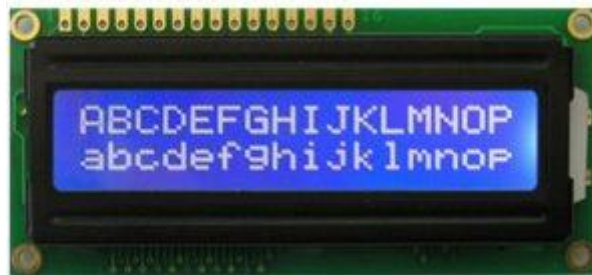


**Figura 2.2.17.27:** Componentes del SENSOR DHT22

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)

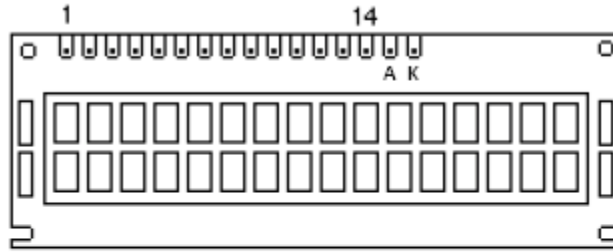
### **2.2.17.7 PANTALLA LCD LCD 16×2 1602 HD44780**

La Pantalla LCD 16×2 1602 es un display LCD de 2 líneas y 16 caracteres que posee un controlador compatible HD44780 de fondo azul y letras blancas, retroiluminado. Por lo cual los mensajes se pueden ver de modo claro tanto en la luz como en la oscuridad. Es indispensable para proyectos electrónicos que requieran visualizar algún tipo de información por su pantalla. Puede ser controlado por medio del Arduino instalando la librería LiquidCrystal.



**Figura 2.2.17.28:** Pantalla LCD 16x2 HD44780

**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)



Pin No	Name	Description
1	Vss	GND
2	Vdd	+5v
3	Vo	Contrast Control
4	RS	Register Select
5	R/W	Read/Write
6	E	Enable ( <i>Strobe</i> )
7	D0	Data <i>LSB</i>
8	D1	Data
9	D2	Data
10	D3	Data
11	D4	Data
12	D5	Data
13	D6	Data
14	D7	Data <i>MSB</i>

**Figura 2.2.17.29:** Distribución de Pines Pantalla LCD 16x2 HD44780

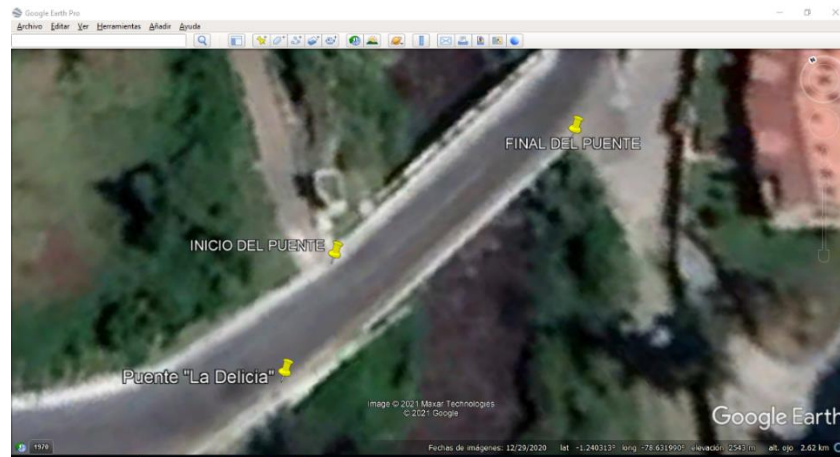
**Fuente:** Archila, D., Santamaría, F. (2013)

## CAPITULO III

### MARCO METODOLOGICO

#### 3.1 Ubicación

En el sector conocido como La Delicia de la Parroquia Atocha – Ficoa de la ciudad de Ambato, se levanta un puente de hormigón tipo viga sobre el Rio Ambato, con unas dimensiones de 30m de luz (distancia de proyección horizontal entre los apoyos de la viga del puente), 9 m de ancho y a una altura de 6,5 m, cuyo objetivo principal es conectar el centro de la ciudad con varios sectores del lado este, además de ser una alternativa para descongestionar el tráfico que se genera debido al transporte urbano que viene del centro de la ciudad durante el día. Por tal motivo e importancia que representa esta estructura vial para la ciudad de Ambato, se ha seleccionado esta edificación como elemento de control y observación para diagnosticar su estado estructural.



**Figura 3.1:** Ubicación geográfica del puente a analizar

**Fuente:** Google Maps (2021).



**Figura 3.2:** Puente “La Delicia” (Vista de Frente)

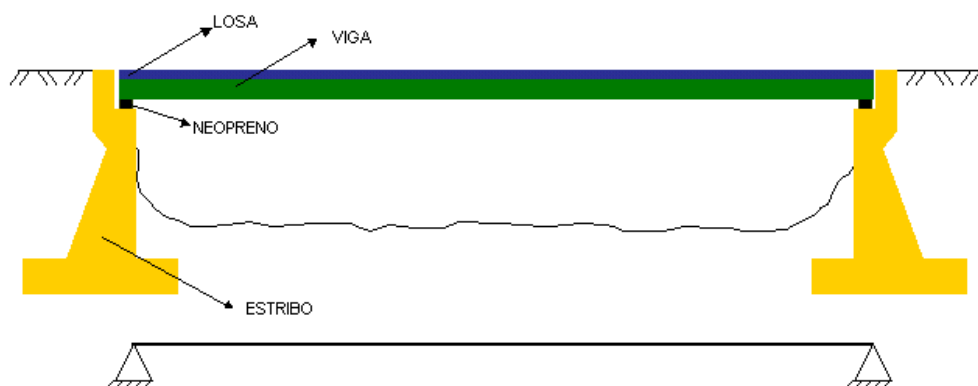
**Fuente:** El Investigador



**Figura 3.3:** Puente “La Delicia” (Vista Lateral)

**Fuente:** El Investigador





**Figura 3.4:** Composición estructural del Puente “La Delicia”

**Fuente:** El Investigador

### 3.2 Equipos y Materiales

Los equipos y materiales utilizados para el desarrollo de la investigación se describen en la tabla.

**Tabla 3.1.21:** Equipos y materiales

<b>Equipos, servicios o materiales</b>	<b>Costo (USD)</b>
Equipos	500
Materiales	450
Transporte	100
Gastos varios	100
Total	1150

**Fuente:** Elaborado por el investigador

### **3.3 Tipo de Investigación**

#### **3.3.1 Investigación Bibliográfica-Documental**

Para el planteamiento y desarrollo de la propuesta se investigaron varias fuentes de referencia como libros, publicaciones científicas y proyectos de titulación relacionados.

#### **3.3.2 Investigación de Campo**

Con los trabajos de campo realizados en el sitio del problema, se obtuvo información y datos reales esenciales para el correcto diseño de la propuesta. Así como también evidenciar la zona y el entorno natural del lugar en donde se encuentra levantada la estructura a analizar, deduciendo posibles cambios y comportamientos climáticos a futuro.

### **3.4 Hipótesis – pregunta científica – idea a defender**

¿El desarrollo de un prototipo para el monitoreo de salud estructural en puentes de hormigón preverá daños o colapsos de la estructura?

### **3.6 Recolección de Información**

En el presente proyecto de titulación se emplearon varias técnicas para la recolección de información como en libros, artículos y revistas científicas, artículos académicos, proyectos de investigación relacionados y además la guía del tutor asignado para el desarrollo del proyecto.

### **3.5 Población o Muestra**

Para la presente investigación científica se emplea el muestreo no probabilístico de tipo discrecional para el desarrollo de la propuesta, siendo el investigador el encargado de seleccionar el área adecuada y disponible para realizar las pruebas de campo.

### **3.7 Procesamiento de la Información y Análisis Estadístico**

Luego de haber obtenido la información necesaria se realizó un proceso de análisis estadístico y técnico el cual consistió en lo siguiente:

- Análisis de la información recolectada.
- Revisión de los diferentes archivos de registros de vibraciones de la estructura obtenidos.

### **3.8 Variable respuesta o Resultados Alcanzados**

Los resultados a alcanzar en este proyecto de investigación es que mediante el desarrollo de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de salud estructural de puentes de hormigón se pueda estimar el estado actual y a futuro de la estructura que conforma el mismo, tomando como modelo a estudiar el puente denominado La Delicia ubicado en la parroquia Ficóa de la ciudad de Ambato, en el cual dependiendo de los tipos de tráfico o cargas que soporta durante el día el sistema pueda recolectar datos gracias a los sensores desplegados a lo largo de la luz del puente y así poder tomar acciones preventivas y correctivas para la preservación y el mantenimiento adecuado de dicha estructura.

## **CAPITULO IV**

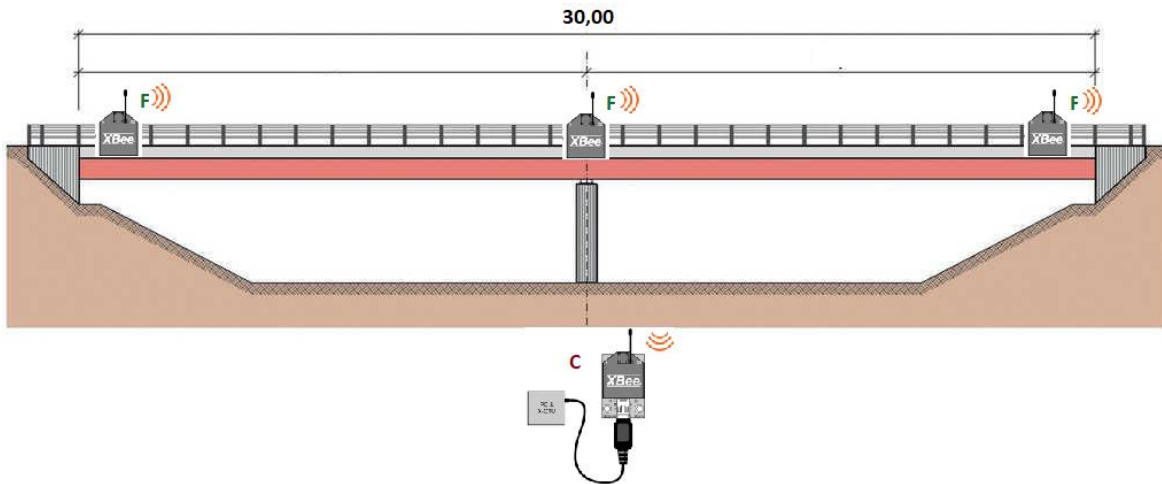
### **ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS**

#### **RESULTADOS Y DISCUSION**

##### **4.1 DISEÑO DE LA RED DE SENSORES INALAMBRICA**

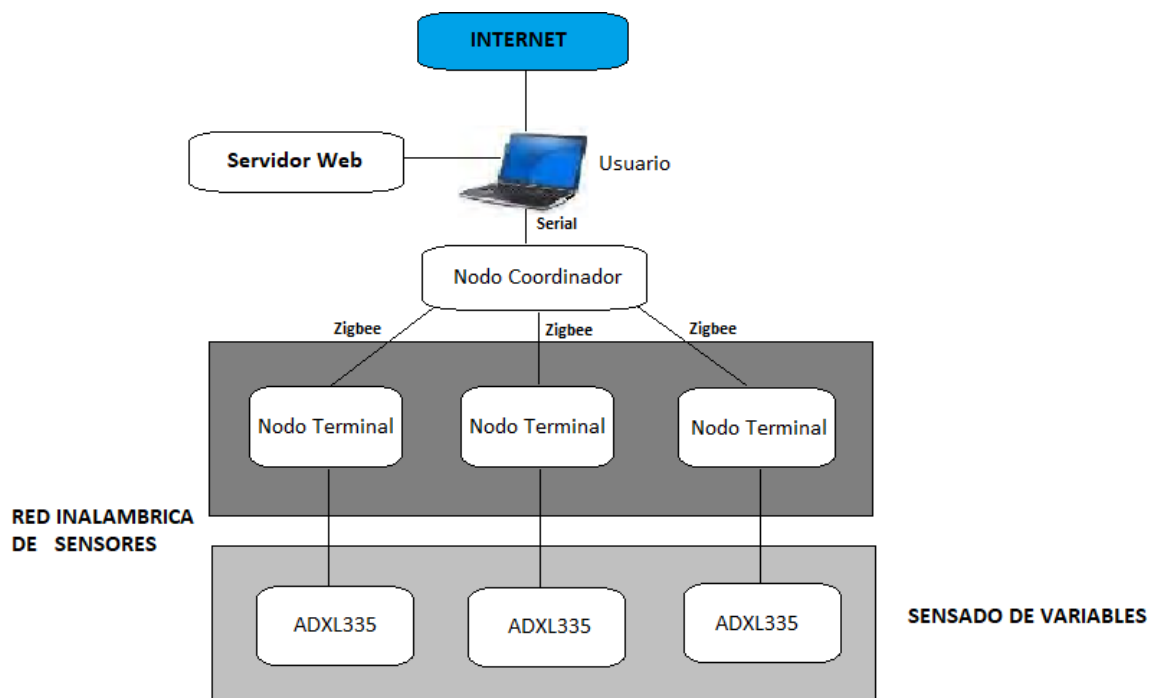
Para el desarrollo del presente Proyecto se seleccionó el protocolo de comunicación inalámbrica ZigBee principalmente por su bajo consumo energético comparado con Wi-Fi y Bluetooth con un consumo de 30mA en transmisión y de 3uA en reposo, lo cual es sumamente importante en el diseño y despliegue de los nodos debido a la ubicación geográfica de la estructura a analizar. Además, el alcance de transmission de la señal de los nodos de esta red ZigBee cubre un area de 1km con un ancho de banda de 250kbps, utilizando bandas de radio libres y sin necesidad de licencias. logrando obtener una red de sensores inalámbrica flexible y escalable.

Al ser un puente de tipo viga, esta compuesto por dos soportes verticales, sobre los cuales se encuentra colocado la viga y la losa de hormigón, por tal motivo los sensores de aceleración se distribuyeron estratégicamente a lo largo de la estructura para poder captar lecturas de las vibraciones del puente en sus puntos más críticos ante el paso del tráfico vehicular, según los datos obtenidos por el investigador, el puente posee una luz de 30 m, en donde se van a distribuir los nodos terminales cada 9,5 m desde el inicio para cubrir los puntos ya mencionados anteriormente, como se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1:** Diagrama General de la Red WSN

**Fuente:** El Investigador

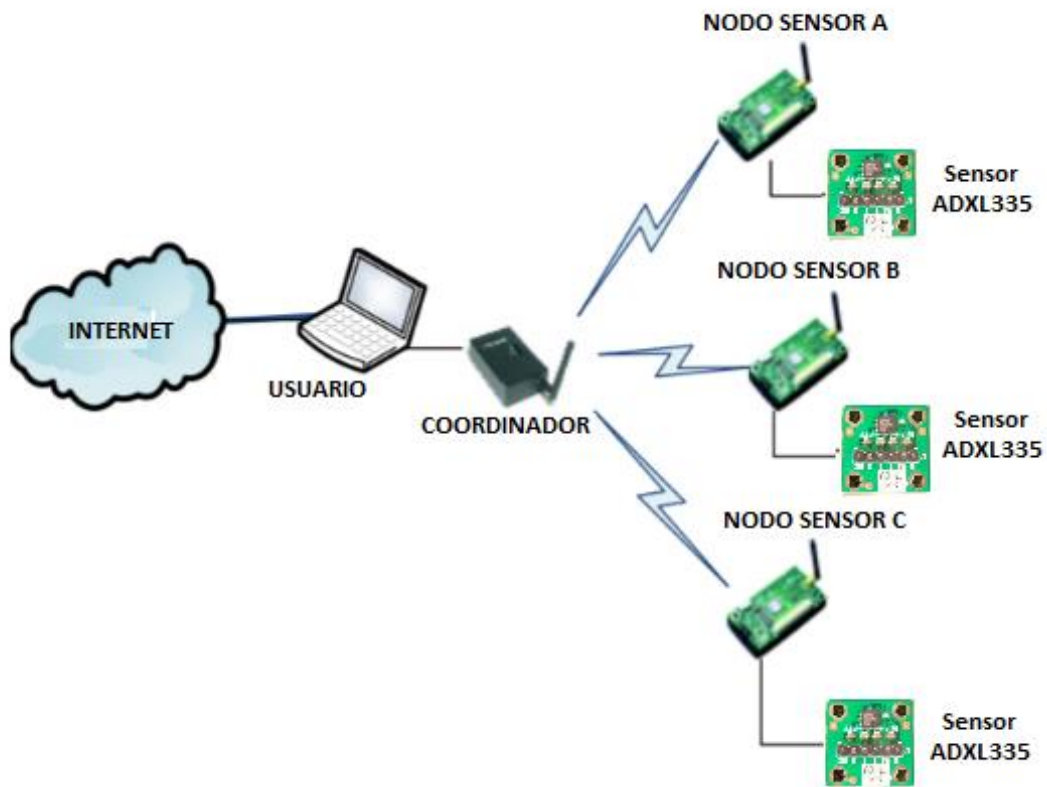


**Figura 4.2:** Esquema de Sistema de Monitoreo

**Fuente:** El Investigador

## 4.2 TOPOLOGIA DE LA RED WSN

La topología física que se empleó en el sistema realizado es la de estrella, debido a que es la mejor manera de aplicar una red WSN para obtener mediciones de entornos exteriores, optimizando la entrega de paquetes en un 97,9%, el rendimiento de 0,7542 Kbps, un retraso de 0,0162 ms, con un consumo de energía bajo y una mayor cobertura de los sensores distribuidos en la red, logrando una comunicación inalámbrica efectiva entre los nodos A, B, y C con el nodo coordinador, el cual se conecta con el servidor para que posteriormente el usuario pueda procesar los datos recolectados por los sensores, como se muestra en la figura 4.3.

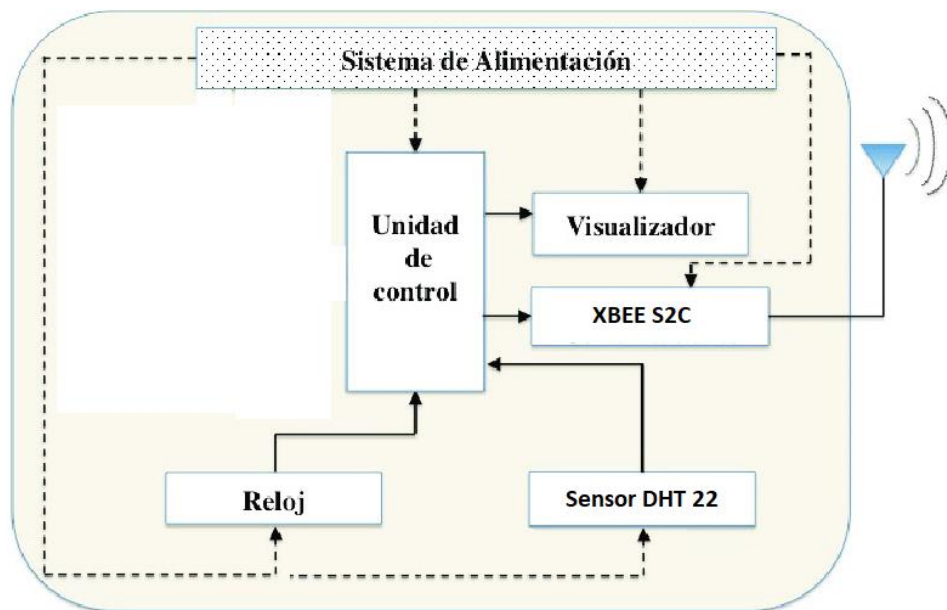


**Figura 4.3:** Diagrama Red WSN

**Fuente:** El Investigador

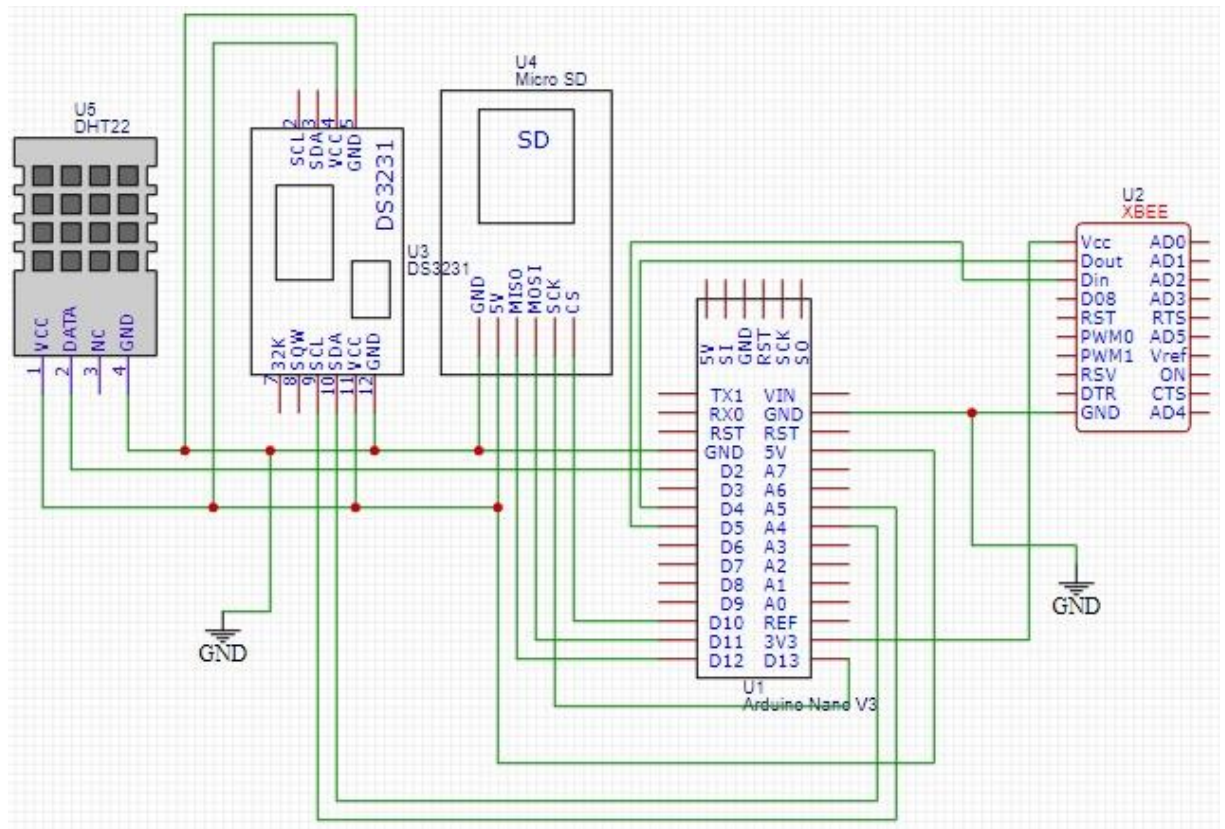
### 4.3 NODO COORDINADOR ZIGBEE

El nodo coordinador de la red es el encargado de establecer la comunicación y enrutar los paquetes provenientes de los nodos A, B y C. Este nodo se encuentra compuesto por un reloj central el cual es el encargado de proporcionar información de la zona horaria del lugar en donde se encuentre ubicado el sistema, además en su diseño consta un sensor ambiental de temperatura y humeado del entorno. Logrando crear un nodo central muy completo en cuanto a la recolección de información necesaria para monitorear el estado de la salud estructural de los puentes de hormigón, la cual se la puede visualizar por medio de una pantalla LCD, como se aprecia en la figura. 4.4.



**Figura 4.4:** Esquema del Nodo Coordinador

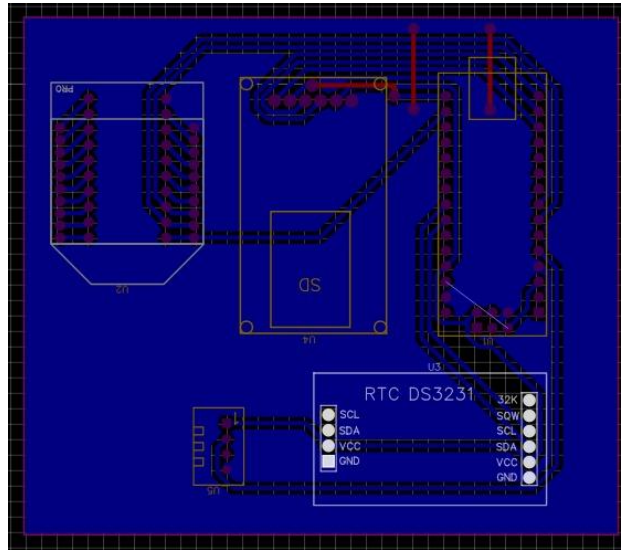
**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.5:** Diagrama del Nodo Coordinador

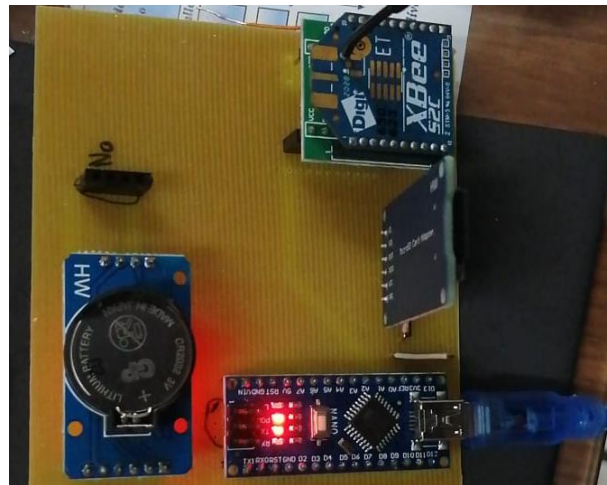
**Fuente:** El Investigador





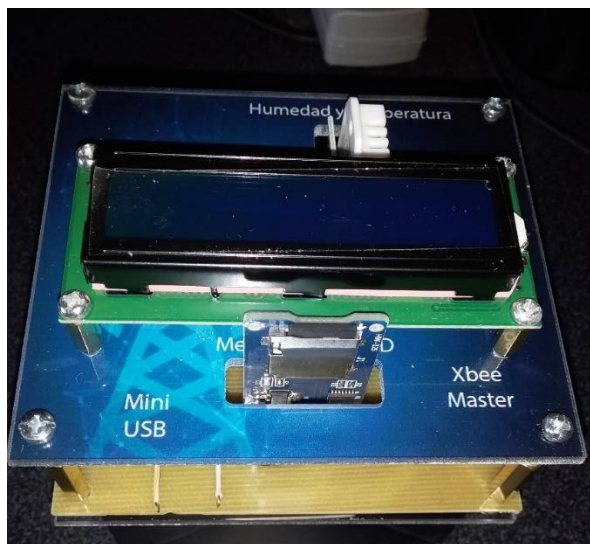
**Figura 4.6:** Diseño de la placa para Nodo Coordinador

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.7:** Elaboración de la placa del Nodo Coordinador

**Fuente:** El Investigador

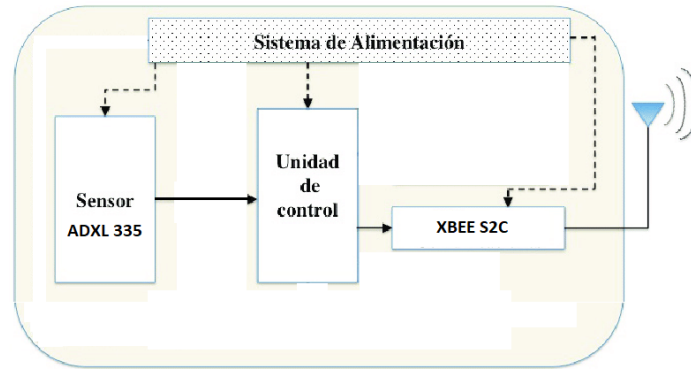


**Figura 4.8:** Ensamblaje del Nodo Coordinador

**Fuente:** El Investigador

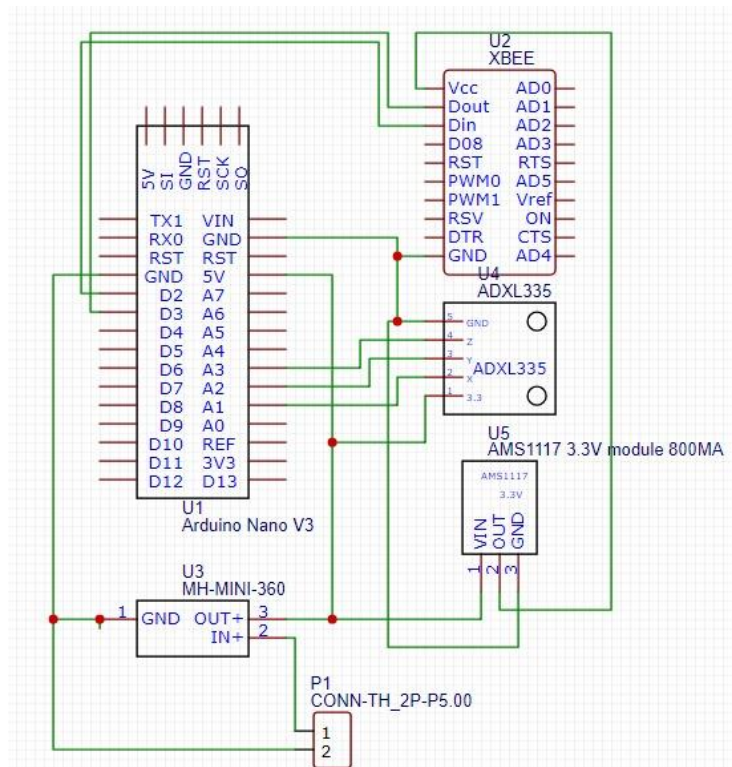
#### **4.4 NODOS TERMINALES ZIGBEE**

Los nodos A, B, C del sistema están compuestos por dispositivos sencillos, pero a la vez más robustos, siendo los elementos encargados de enviar los datos captados por los sensores hacia el nodo coordinador. Al ser un puente de tipo viga, posee dos soportes verticales, sobre los cuales se encuentra colocado la viga y la losa de hormigón, por tal motivo los nodos se distribuyeron estratégicamente a lo largo de la estructura para poder captar lecturas de las vibraciones del puente en sus puntos más críticos ante el paso del tráfico vehicular, como son al inicio, en el centro y a la salida del puente. En su diseño se encuentra ubicado el sensor ADXL335 el cual es el encargado de obtener y adecuar la señal que se va a analizar posteriormente y determinar la deflexión de la viga. Además, estos nodos están conectados a un regulador de voltaje de 3,3V para estabilizar la energía que proporcionan las baterías.



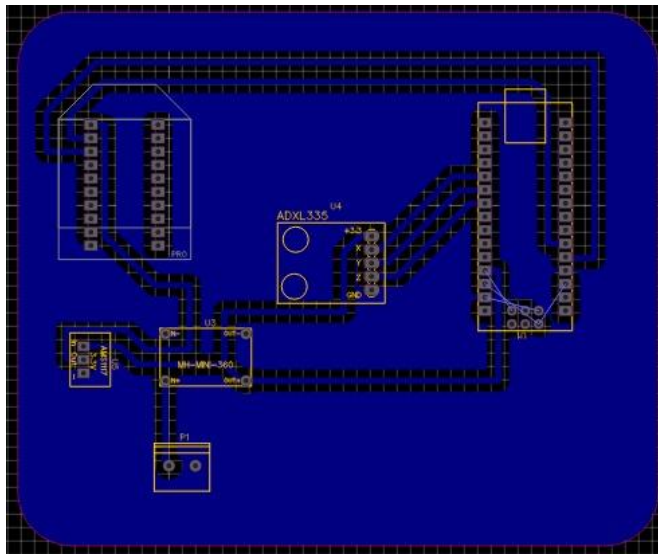
**Figura 4.9:** Esquema del Nodo Coordinador

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.10:** Diagrama del Nodo Coordinador

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.11:** Diseño de la placa para los Nodos Terminales

**Fuente:** El Investigador



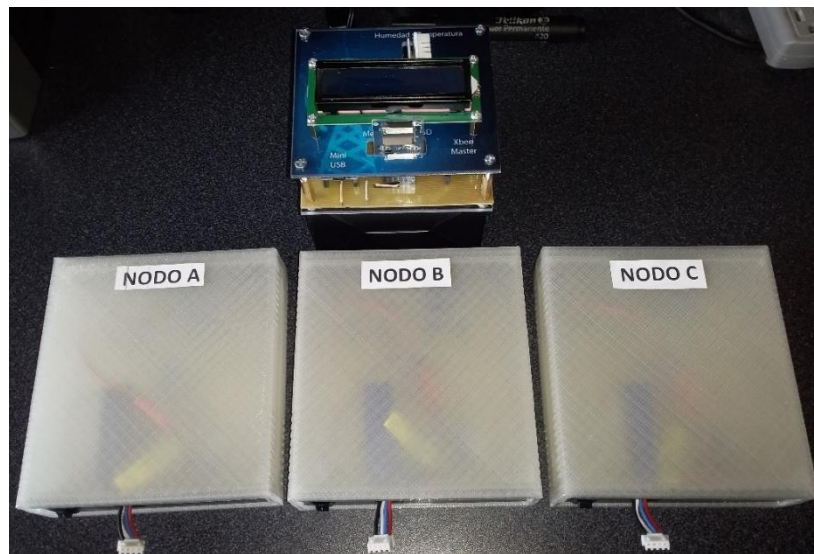
**Figura 4.12:** Elaboración de las placas de los Nodos Terminales

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.13:** Ensamblaje de los Nodos Terminales

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.14:** Prototipo de la Red WSN

**Fuente:** El Investigador

#### **4.5 IMPLEMENTACION DE LA RED WSN**

El presente proyecto de titulación fue implementado en el puente denominado “La Delicia” ubicado entre la Parroquia Ficoa y el centro de la ciudad de Ambato por medio del cual se conecta estos dos sectores de la ciudad. En este lugar se ubicó los componentes que conforman el sistema de monitoreo según el diseño establecido anteriormente, desplegando los nodos finales A, B, C sobre la base de la estructura, a 10m de distancia uno de otro a lo largo de la luz del puente. Posteriormente se ubicó el nodo coordinador en un lugar adecuado donde se pueda establecer la comunicación de la red y proceder a realizar el monitoreo de las vibraciones de la estructura por parte del investigador como se aprecia en la figura 4.15.



**Figura 4.15:** Ingreso este del puente “La Delicia”

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.16:** Ubicación de los nodos terminales en la estructura del puente

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.17:** Señalización de los nodos terminales

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.18:** Montaje del nodo coordinador “Estación Base”

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.19:** Encendido y verificación de la comunicación de la Red WSN

**Fuente:** El Investigador

Una vez ya implementada la red WSN, se procedió a realizar el monitoreo de la estructura durante varios lapsos de tiempo, en diferentes horarios y días de la semana, tomando en cuenta las horas más adecuadas para realizar las pruebas pertinentes y



obtener una base de datos con la cual se pueda estimar un modelo del comportamiento del puente ante diferentes tipos de tráfico.



**Figura: 4.20:** Monitoreo de las vibraciones de la estructura analizada

**Fuente:** El Investigador

Una vez almacenados los datos recolectados, se procedió a realizar el análisis de los resultados obtenidos, clasificándolos en dos escenarios diferentes el primero con los datos obtenidos en los lapsos de tiempo en horas pico del día y el segundo con los datos recolectados en horarios de poco tránsito. Mediante este proceso de toma de datos durante diferentes periodos de tiempo se puede obtener una respuesta de resonancia sostenida en el equipo, la cual al combinarse con la frecuencia de muestreo pasa a convertirse en un desplazamiento (g) para estimar el estado de salud en que se

encuentra la estructura del puente “La Delicia”. Donde podemos observar que según las figuras los valores generados en las gráficas son bajos, y cuyos valores no exceden los límites establecidos por la norma internacional según la tabla 2.10. Además, se puede apreciar que los valores más altos de vibración se presentan en el Nodo terminal B ubicado en el centro de la estructura del puente, el cual por su diseño no

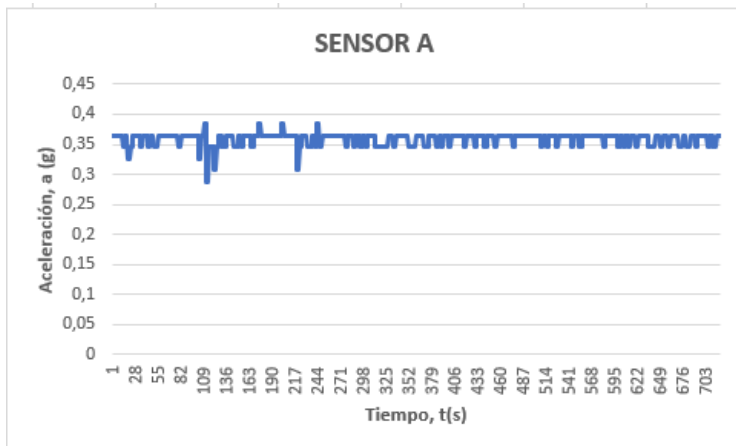
posee un soporte central provocando que en este punto se genere el mayor esfuerzo al estar sometido a algún tipo de carga.

1	SENSOR A	SENSOR B	SENSOR C	TEMPERATURA	HUMEDAD	FECHA	HORA
2	0,365	0	0	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:46
3	0,365	0,346	0	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:46
4	0,365	0,346	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:46
5	0,365	0,365	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:46
6	0,365	0,365	0,287	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:46
7	0,365	0,326	0,287	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:46
8	0,365	0,326	0,307	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:46
9	0,365	0,365	0,307	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
10	0,365	0,365	0,307	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
11	0,365	0,365	0,307	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
12	0,365	0,404	0,307	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
13	0,365	0,404	0,287	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
14	0,346	0,404	0,287	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
15	0,346	0,404	0,287	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
16	0,346	0,346	0,287	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
17	0,365	0,346	0,287	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
18	0,365	0,346	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
19	0,365	0,326	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
20	0,326	0,326	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
21	0,326	0,326	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:47
22	0,326	0,326	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:48
23	0,346	0,326	0,326	21.000	62.200	30/9/2021	0:12:48

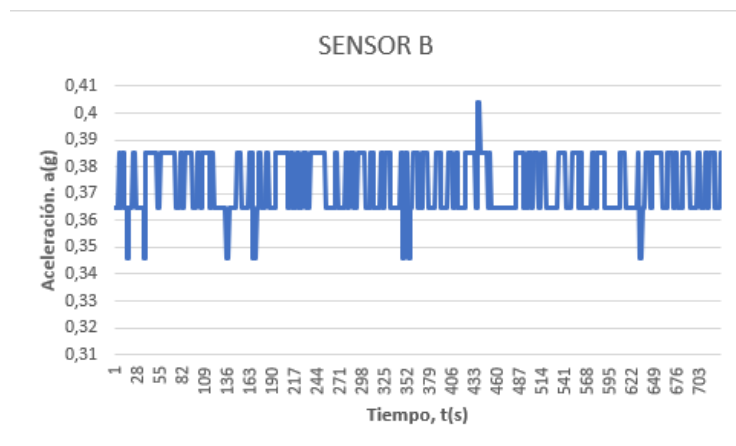
**Figura: 4.21:** Registros del Monitoreo de las vibraciones de la estructura analizada

**Fuente:** El Investigador

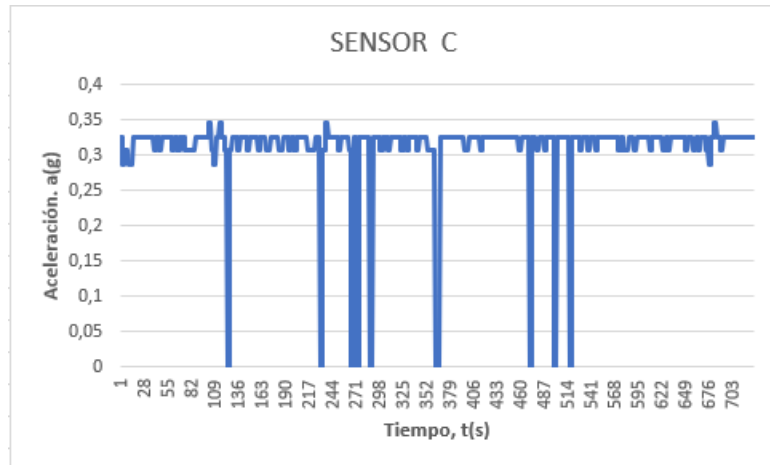
En la figura 4.22 observamos el comportamiento de los 3 nodos A, B, C durante ciertos intervalos de tiempo en horarios de mucho tránsito durante el día. Se puede apreciar que los valores del desplazamiento (g) varían entre 0,3 y 0,4 dependiendo de la ubicación del sensor, siendo el nodo B el que presenta mayor fluctuación ante la presencia de tráfico en la estructura.



**Figura 4.22:** Comportamiento del nodo A  
**Fuente:** El investigador



**Figura 4.23:** Comportamiento del nodo B  
**Fuente:** El investigador



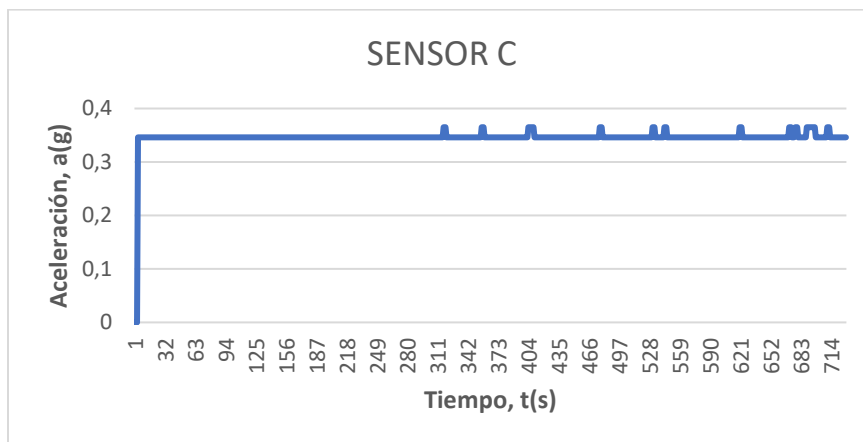
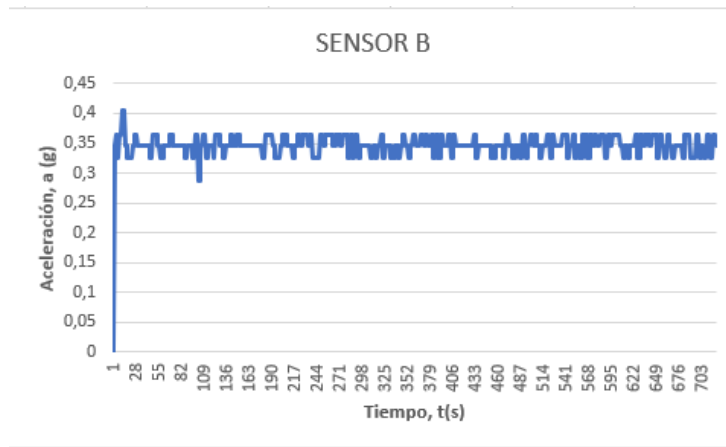
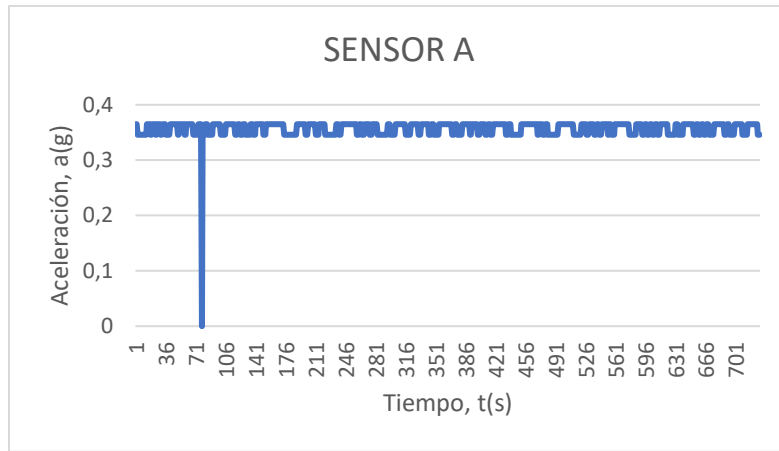
**Figura 4.24:** Comportamiento de la estructura del puente  
**Fuente:** El investigador

En la figura 4.25 se puede apreciar los registros de las vibraciones de la estructura del puente, correspondientes a horarios de poco tránsito durante los días de la semana, en donde se puede apreciar un comportamiento diferente al registro anterior. El valor del desplazamiento (g) (no varía tanto) y en algunas ocasiones permanece en un estado constante. Así mismo el comportamiento de los nodos es similar al caso anterior, siendo el nodo B el que presenta mayor variación ante la presencia de una carga sobre la estructura.

1	SENSOR A	SENSOR B	SENSOR C	TEMPERATURA	HUMEDAD	FECHA	HORA
2	0,365	0	0	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:06
3	0,365	0,365	0	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:06
4	0,346	0,365	0	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:06
5	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:06
6	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:06
7	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
8	0,346	0,385	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
9	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
10	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
11	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
12	0,346	0,385	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
13	0,346	0,385	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
14	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
15	0,365	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
16	0,365	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
17	0,365	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
18	0,365	0,346	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:07
19	0,346	0,346	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:08
20	0,346	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:08
21	0,365	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:08
22	0,365	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:08
23	0,365	0,365	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:08
24	0,365	0,385	0,346	26.200	39.000	30/9/2021	13:43:08
25	0,346	0,385	0,346	26.000	40.500	30/9/2021	13:43:08
26	0,346	0,385	0,346	26.000	40.500	30/9/2021	13:43:08
27	0,365	0,385	0,346	26.000	40.500	30/9/2021	13:43:08

**Figura: 4.25:** Registro del monitoreo de las vibraciones de la estructura analizada

**Fuente:** El Investigador



**Figura 4.26:** Comportamiento de la estructura del puente

**Fuente:** El investigador

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBIOGRAFIA Y ANEXOS

#### 5.1 Conclusiones

- La Red WSN planteada demostró ser capaz de monitorear el estado de salud estructural del puente “La Delicia”, optimizando recursos humanos y económicos a futuro.
- Los nodos elaborados con los sensores ADXL 335 y DHT 22, lograron obtener información precisa y fiable generadas por la vibración de las cargas que circulan por el puente y de la temperatura y humedad respectivamente del lugar donde se encuentra la estructura analizada.
- Los resultados obtenidos por medio de la red WSN implementada, permitieron tener una estimación del estado de salud estructural del puente “La Delicia”, el cual se encuentra en una buena condición según los rangos de vibración obtenidos por los sensores, los cuales fluctúan entre 0,35 y 0,4 para el desplazamiento (g). Encontrándose muy por debajo del rango máximo establecido por las normas internacionales, para que este tipo de construcción empiece a presentar un deterioro visible en su estructura.
- Las prestaciones que nos brinda esta red de sensores inalámbricos por medio del protocolo Zigbee, como son su bajo costo, seguridad, consistencia, bajo consumo de energía y alcance, le han permitido ubicarse entre las tecnologías más utilizadas actualmente en los sistemas de monitoreo y control, gracias a sus múltiples topologías, escalabilidad y adaptabilidad de sus nodos, logrando obtener una óptima comunicación y alta transmisión de datos.

## 5.2 Recomendaciones

- Para mejorar la capacidad del sistema implementado, se podría gestionar la inversión por parte de la empresa pública o privada y así conseguir dispositivos más robustos y de mayores prestaciones, capaces de brindar un tiempo mayor o ininterrumpido de operación de los nodos terminales, los cuales debido a su localización poseen un suministro limitado de energía.
- Investigar nuevos métodos para el monitoreo de salud estructural de puentes de hormigón y de otro tipo de estructuras civiles, capaces de integrar este tipo de sistemas con las nuevas tecnologías y dispositivos que van apareciendo en la actualidad.
- Proponer algún tipo de sistema alternativo de energía, el cual sea capaz de aprovechar el entorno físico para generar y abastecer de energía al nodo. Ampliando el tiempo de operación de los nodos.



## 5.3 BIBLIOGRAFIA

### REFERENCIAS

[1] Mejía Chuva, Á. T., & Salazar Vallejo, J. A. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo para el análisis de salud estructural de un puente a través de una red de sensores inalámbricos utilizando el software matlab* (Bachelor's thesis).

[2] Cárdenas Sánchez, W. A. (2020). *Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un Sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab* (Bachelor's thesis).

[3] Sepúlveda Bustos, D. F. (2020). *Sistema de monitoreo, basado en redes de sensores inalámbricos, para la medición de variables de interés aplicado a la arquitectura bioclimática.*

[4] Arguero Tello, J. D. (2020). *Desarrollo de una red de sensores inalámbricos con comunicación Zigbee para el monitoreo de una estación didáctica* (Bachelor's thesis).

[5] Barrio Vera, L. L., & Fajardo Torres, K. A. (2020). *Diseño e implementación de un prototipo de red de sensores inalámbricos o WSN (WIRELESS sensor network) para controlar la temperatura en ambientes industriales* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Carrera de Ingeniera en Networking y Telecomunicaciones).

- [6] Ahlborn, T.M., Shuchman, R., Sutter, L.L., Brooks, C.N., Harris, D.K., Burns, J.W. & Oats, R.C. (2010). *The State-of-the-Practice of Modern Structural Health Monitoring for Bridges: A Comprehensive Review*. Michigan Technological University.
- [7] Enckell, M. (2011). *Lessons Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology*. Doctorate Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [8] Wenzel, H. (2009). *From Structural Health Monitoring to Risk based Infrastructure Management*. Paper presented at the 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4) 2009, Zurich, Switzerland.
- [9] Comisu, C. C., Taranu, N., Boaca, G., & Scutaru, M. C. (2017). Structural health monitoring system of bridges. *Procedia engineering*, 199, 2054-2059.
- [10] Sousa, H., Félix, C., Bento, J., & Figueiras, J. (2011). Design and implementation of a monitoring system applied to a long-span prestressed concrete bridge. *Structural concrete*, 12(2), 82-93.
- [11] Haritos, N., & Owen, J. S. (2004). The use of vibration data for damage detection in bridges: a comparison of system identification and pattern recognition approaches. *Structural Health Monitoring*, 3(2), 141-163.
- [12] Rivera, V. M., MENDOZA DIAZ, A., CARRION VIRAMONTES, F. J., LOZANO GUZMAN, A., FABELA GALLEGOS, M. J., VAZQUEZ VEGA, D., & ROMERO NAVARRETE, J. A. (1999). Un análisis de los procedimientos de

adquisición y manejo de la información de accidentes carreteros en México.

*PUBLICACION TECNICA*, (131)

[13] Guaña Moya, E. J. (2016). *Diseño de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura* (Bachelor's thesis, Quito, 2016.).

[14] Guillermo, E. D., Adrian Alfredo, H. M., & José Alberto, G. P. (2012, October). 1752-PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS DE IMAGENOLOGÍA DE TEJIDOS POR ESPECTROMETRÍA DE MASAS MALDI. In *Cuba Salud 2012*.

[15] Al-Bayati, Nabeel. (2017). AASHTO Standard Specifications For Highway Bridge 1996. 10.13140/RG.2.2.19815.04008.

[16] Avila Pesantez, Diego. (2015). Evaluación de las topologías físicas de redes WSN para la medición de variables ambientales. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*. III. 59-165. 10.26423/rctu.v3i1.84.

[17] W. Rücker, F. Hille and R. Rohrmann, "Guideline for the assessment of existing structures," Federal Institute of Materials Research and Testing , Germany , 2006.

[18] C. R. W. K. Farrar, "An introduction to structural health monitoring," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 10, pp. 303-315, 2007.

- [19] "Puentes antiguos y en mal estado son peligro latente," Diario Panamá América, 27 Julio 2013.
- [20] O. A. Araúz and S. M. Rodríguez, Identificación estructural de puentes basado en la vibración (tesis de pregrado), Universidad Tecnológica de Panamá , 2016.
- [21] O. Castejón, "Diseño y análisis de experimentos," 2011. [Online]. Available: <http://www.uru.edu/fondoeditorial/libros/pdf/manualestatistix/>.
- [22] O. Salawu, "Detection of Structural Damage trough changes in frequency: a review," Elsevier Sciences, vol. 19, no. 9, pp. 718- 723, 1997.
- [23] G. K. C. P. Hyunjun Jung, "Impact Factors of Bridges based on natural frequency for various superstructure types," KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 458-464, 2013.
- [24] Archila, D., Santamaría, F. (2013) Estado del arte de las Redes de Sensores Inalámbricos. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- [25] Arduino Nano (S.F) Características del Arduino Nano. Obtenido de: <https://arduinodehtics.weebly.com/>
- [26] Arduino. (2015) Que es Arduino. Chile, Obtenido de: <https://arduino.cl/quesarduino/>

[27] Arduino. (2015) Tipos de Arduino. Chile, Obtenido de: <https://arduino.cl/quesarduino/>

[28] Arencibia, J. (2008). Conceptos fundamentales sobre el mantenimiento de edificios. Revista de Arquitectura e Ingeniería. Matanzas, Cuba.

[29] B. H. Koh, S. J. Dyke, (2007) Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data, Computers and Structures, Vol. 85.

[30] Botero, J.C. (2018) Sistema de Monitoreo de edificaciones. Colombia: Universidad EAFIT, obtenido de: <http://www.eafit.edu.co/innovacion/transferecia/Paginas/monitoreo-deedificios.aspx>

[31] C. R. Farrar, K. Worden, (2013) Structural health monitoring a machine learning perspective, 1st Edition, John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom.

[32] Camacho, P. (Enero 2019) Diseño de un Plan Modelo de Mantenimiento para Edificios del ICE. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

[33] CAPRILE, S. (2009) Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15. 4. Buenos Aires, Argentina: Gran Aldea Editores, 2009.pp.77.

[34] Cifras Ecuador, (2016).Incrementó vehicular según el INEC. [En línea] Disponible en: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/el-parque-automotor-de-ecuador-crecio-57-en-cinco-anos/>

[35] Tarng, Wernhuar & Lin, Chia-Hwei & Liou, Hsin-Hun. (2011). Applications of Wireless Sensor Networks in Fall Detection for Senior People. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*.

M. Ruiz, E. Álvarez, A. Serrano and E. Garcia, "The Convergence between Wireless Sensor Networks and the Internet of Things; Challenges and Perspectives: a Survey," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 10, pp. 4249-4254, Oct. 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7786301.

## 5.4 ANEXOS

### 5.4.1 PRESUPUESTO TOTAL

Presupuesto de la RED WSN Implementada			
Ítem	Cantidad	Precio	Total
Xbees S2C	4	40	160
Adaptador Xbee DIP	4	3	12
Arduino Nano	4	7	28
Sensor ADXL335	3	10	30
Regulador 3.3 V	3	1,5	4,50
Bornera Doble	3	0,20	0,60
Espadín Hembra	5	0,25	1,25
Mini Switch	3	0,50	1,50
Batería 3 Celdas 450mAh	3	20	60
Cable para batería	3	0,25	0,75
Modulo Micro SD	1	2,50	2,50
Modulo RTC Reloj	1	3,50	3,50
Sensor DHT22	1	7	7
Pantalla I2c LCD	1	7	7
Pila para modulo CR2032 GP	1	0,75	0,75
Cargador de Baterías	1	13	13
Impresión 3d Cajas	3	7,50	22,50
Circuito Impreso Sensores	3	16	48
Circuito Impreso Coordinador	1	13,5	13,5
Protector Acrílico para coordinador	1	6	6
Minipostes metal	4	1	4
Computador	1	500	500
Movilización	10	1,25	12,50
		<b>TOTAL</b>	<b>945,60</b>

## PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACION DE LAS PLACAS ELECTRONICAS

1. Diseñar los circuitos esquemáticos completos de los prototipos.
2. Adquirir todos los elementos electrónicos utilizados en el diseño de los diagramas.
3. Realizar el armado y las pruebas del correcto funcionamiento de los prototipos en la protoboard.
4. Creación del diseño a fabricar en computadora (CAD) en el programa Easy Eda.
5. Diseño y creación de las rutas a seguir por la máquina CNC y la elección de las herramientas de software (CAM), para poder controlar la máquina CNC.
6. Distribución de los elementos electrónicos en las placas ya elaboradas.
7. Realizar el soldado de los diferentes componentes de los prototipos.
8. Montaje del chasis y protecciones de los prototipos.

## CALCULOS DE CORRIENTE I, VOLTAJE V Y POTENCIA PARA LAS PISTAS DE LAS PLACAS DISEÑADAS.

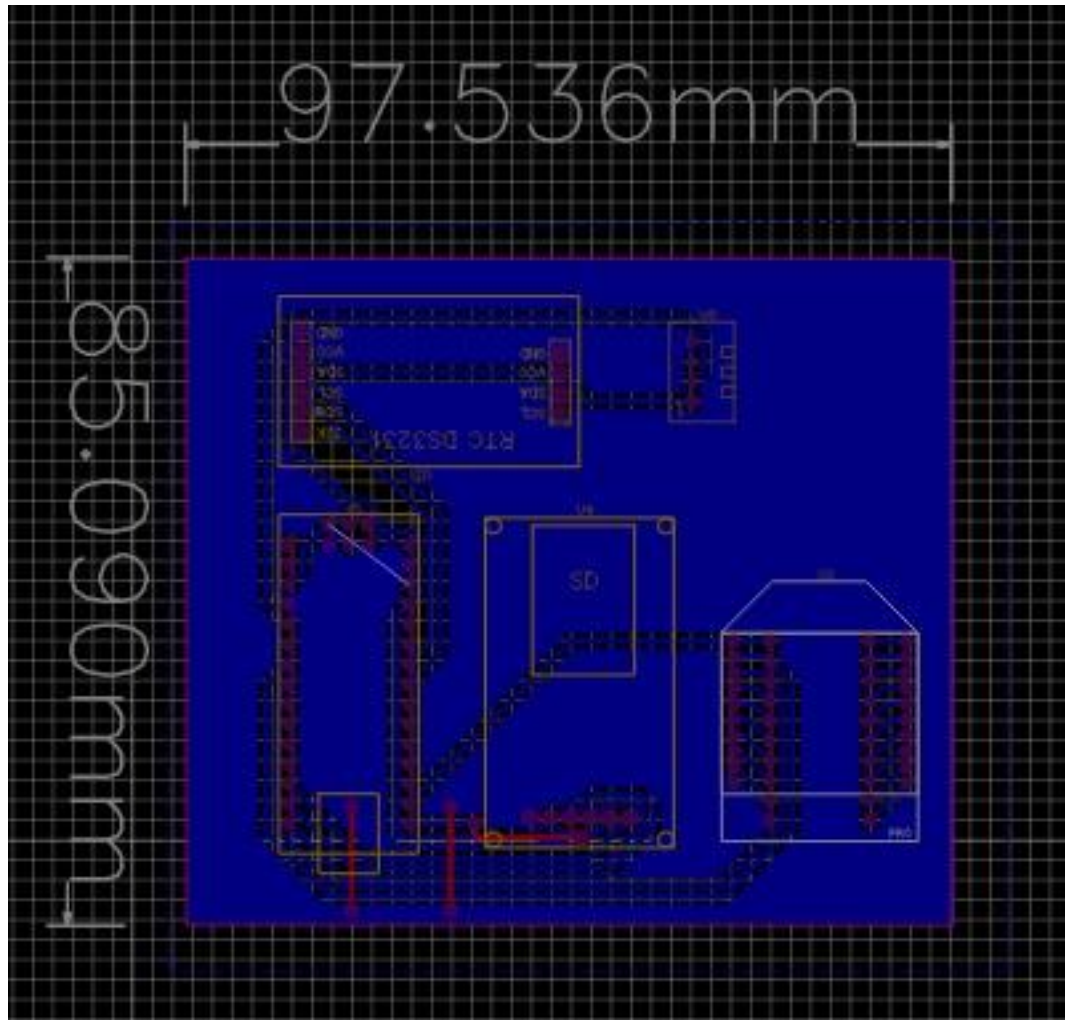
El calculo estima los resultados para el estándar IPC-2221. Los resultados son validos hasta 35A (17.5 para una pista interna), amplitudes de 400mil y una subida de temperatura máxima de 100°C.

Corriente	2.8 A
Longitud de la Pista	100 mm
Espesor del Cobre	1 oz (35 $\mu$ m) ▼
Capa de la Pista	Externa (al Aire) ▼
Temperatura Ambiente	25 °C
Subida de Temperatura Permitida	10 °C
Ancho de pista necesario:	1.24 mm 48.9 mil
Resistencia de la Pista:	40.6 m $\Omega$
Caida de Voltaje:	113.69 mV
Potencia disipada:	318.32 mW



## PLANOS DE LAS PLACAS DE LOS NODOS COORDINADOR Y FINAL

### NODO COORDINADOR





## 5.4.2 CODIGO FUENTE DE LA PROGRAMACION DEL PROTOTIPO

### XBEE COORDINADOR

```
xbec_receptor

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include "DS3231.h"
#include <Wire.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT22
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

/*#define DHTPIN 4 // what pin we're connected to
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302)
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Initialize DHT sensor fo
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
RTClib RTC;
String message = "";
String dataString = "";
bool messageReady = false;
SoftwareSerial mySerial(4, 5); // RX, TX
float x1, x2, x3;
String dato2;
const int chipSelect = 10;

void setup() {

    lcd.init(); // initialize the lcd
    lcd.init();
```

xbee\_receptor

```
lcd.init(); // initialize the lcd
lcd.init();
lcd.backlight();
Wire.begin();
Serial.begin(9600);
mySerial.begin(38400);
  dht.begin();
//mySerial.println("Hello, world?");
//dht.begin();
Serial.print("Initializing SD card...");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Iniciando...");
if (!SD.begin(chipSelect)) {
  Serial.println("Card failed, or not present");
  lcd.print("Error Tarjeta SD");
  // don't do anything more:
  while (1);
}
lcd.clear();
Serial.println("card initialized.");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("OK");
delay(2000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("WSN-SHM");
}
```

## xbee\_receptor

```
void loop() {
  // Monitor serial communication
  while (mySerial.available()) {
    char thisChar = mySerial.read();
    message += thisChar;
    messageReady = true;
  }

  // Only process message if there's one
  if (messageReady) {
    //Serial.println(message);
    //Serial.println(message);
    if (message.indexOf("X1") > -1) {
      //Serial.print("X1=");
      x1 = message.substring(message.indexOf("X1") + 4).toFloat();
      //Serial.println(x1);
      grabar();
    }
    if (message.indexOf("X2") > -1) {
      //Serial.print("X2=");
      x2 = message.substring(message.indexOf("X2") + 4).toFloat();
      //Serial.println(message.substring(message.indexOf("X2") + 3));
      grabar();
    }
    if (message.indexOf("X3") > -1) {
      //Serial.print("X3=");
      x3 = message.substring(message.indexOf("X3") + 4).toFloat();
      //Serial.println(x3);
      grabar();
    }
  }
}
```

---

```
xbee_receptor
```

```
    message = "";
    messageReady = false;
}
}
void grabar() {
    float h = dht.readHumidity();
    // Read temperature as Celsius (the default)
    float t = dht.readTemperature();
    DateTime now = RTC.now();
    dataString += String(x1, 3);
    dataString += ";";
    dataString += String(x2, 3);
    dataString += ";";
    dataString += String(x3, 3);
    dataString += ";";
    dataString += String(t, 3);
    dataString += ";";
    dataString += String(h, 3);
    dataString += ";";
    dataString += String(now.year());
    dataString += "/";
    dataString += String(now.month());
    dataString += "/";
    dataString += String(now.day());
    dataString += ";";
    dataString += String(now.hour());
    dataString += ":";
    dataString += String(now.minute());
    dataString += " ";
}
```

xbee\_receptor

```
dataString += String(now.minute());
dataString += ":";
dataString += String(now.second());
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print(t,1);
lcd.setCursor(15, 0);
lcd.print("C");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(x1,2);
  lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print(x2,2);
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print(x3,2);

File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
  dataFile.println(dataString);
  dataFile.close();
  // print to the serial port too:
  Serial.println(dataString);
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
  Serial.println("error opening datalog.txt");
}
dataString = "";
}
```

## XBEE TERMINAL

```
xbee_s2c
```

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include "ADXL335.h"

ADXL335 accelerometer;

SoftwareSerial mySerial(3, 2); // RX, TX
String message = "";
bool messageReady = false;
String dato;
char buff[100];

void setup()
{
  // Open serial communications and wait for port to open:

  //doc["X2"] = "gps";
  Serial.begin(9600);
  // set the data rate for the SoftwareSerial port
  mySerial.begin(38400);
  accelerometer.begin();
  //dato.reserve(15);
}

void loop() // run over and over
{
  //if(message=="A"){
  float x,y,z;
  accelerometer.getAcceleration(&x,&y,&z);
```



```
xbee_s2c
// set the data rate for the SoftwareSerial port
mySerial.begin(38400);
accelerometer.begin();
//dato.reserve(15);
}

void loop() // run over and over
{
  //if(message=="A"){
  float x,y,z;
  accelerometer.getAcceleration(&x,&y,&z);
  //Serial.println("value of X/Y/Z: ");
  dato="Xl=";
  dato+= dtostrf(x, 4, 3, buff);
  mySerial.println(dato);
  dato="";
  /*Serial.print("X=");
  Serial.println(x);

  Serial.print("Y=");
  Serial.println(y);

  Serial.print("Z=");
  Serial.println(z);*/

  delay(200);

}
```