



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO
CON MENCIÓN EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO USANDO UNA RED
SENSORES INALÁMBRICOS PARA UN SISTEMA DE MONITOREO DE
EDIFICIOS MEDIANTE SOFTWARE LIBRE Y MATLAB.

AUTOR:

WILSON ALBERTO CÁRDENAS SANCHEZ

TUTOR:

PhD. DAVID BARRIOS

GUAYAQUIL – ECUADOR

2020

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORIA

Yo, **Alberto Cárdenas Sánchez**, autor del trabajo de titulación: “Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab”, declaro que los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones en este trabajo de titulación es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, marzo del 2020



(f) _____

Wilson Alberto Cárdenas Sánchez
C.I. 0952149938


CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHO DE AUTOR

Yo, Wilson Alberto Cárdenas Sánchez con cedula de identidad N.º 0952149938, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial del proyecto de titulación “Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab”.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual Del Ecuador, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra anteriormente citada.

En concordancia, suscribo este documento en el momento que realice la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, marzo del 2020



(f)

Wilson Alberto Cárdenas Sánchez

C.I. 0952149938

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, PhD. David Barrios certifico que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto técnico de titulación “**Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab**”, realizado por el Sr. **Wilson Alberto Cárdenas Sánchez** para la obtención del título de: **INGENIERO ELECTRÓNICO**.

Por medio de la presente certifico que el documento cumple con los requisitos establecidos en el Instructivo para la Estructura y Desarrollo de Trabajos de Titulación para pregrado de la Universidad Politécnica Salesiana.

En virtud de lo anterior, autorizo su presentación y aceptación como una obra auténtica de valor académico.

Guayaquil, marzo 2020

Handwritten signature in black ink, reading "DAVID BARRIOS" in a stylized, slanted font.

(f) _____

PhD. David Barrios
C.I. 09609358238
DEDICATORIA

Este trabajo de titulación primeramente se lo quiero dedicar a Dios por su infinito amor y sabiduría, por permitirme culminar una etapa más en mi vida. A mis padres Wilson Cárdenas y Graciela Sánchez por su amor y su apoyo incondicional en mi vida universitaria, a mis hermanas Fernanda y Alejandra por su apoyo y sus enseñanzas a lo largo de mi vida como estudiante, por el ejemplo de llegar a ser un profesional y a mis amados sobrinos Sofía y Dylan.

En mención especial se lo quiero dedicar a mi mayor inspiración desde que vino a ser parte de mí, a mi Hijo Ethan Gabriel Cárdenas Puma, por ser ese angelito que te alienta a ser mejor cada día, a mi eterna novia Gianella Puma, por su amor y sus enseñanzas, por ser mi acompañante en estos 5 años de carrera universitaria.

Porque todas las cosas proceden de él, y existen por él y para él. ¡A él sea la gloria por siempre!
Amén.

Romanos 11:36

Wilson Alberto Cárdenas Sánchez

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por la sabiduría, para seguir adelante y poder culminar esta carrera. A mis padres por su ayuda brindada, por siempre querer lo mejor para mi vida.

Quiero agradecer a todos los que participaron en este proyecto y que con su opinión se lograron cumplir los objetivos planteados, al mentor de este proyecto el Ing. Gino Alvarado Mejía por ser el pionero de la idea del desarrollo del mismo, también en especial al PhD David Barrios por su colaboración desde que fue asignado a la titulación del proyecto.

A mí querida universidad, a los docentes por todas sus enseñanzas y su mejor predisposición como maestros, que me permitieron crecer como persona.

Hoy es un hasta pronto a mi universidad, con los deseos de volver a ser un formador de nuevos profesionales.

¡Buen viento Buena mar!

RESUMEN

Año	Título	Alumnos	Tutor	Tema de Titulación
2020	Ingeniero Electrónico	Wilson Alberto Cárdenas Sánchez	PhD. David Barrios	Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab.

El presente proyecto surge después de la tragedia que soportó el Ecuador el 16 de abril del 2016 donde un sismo ocasionó pérdidas humanas y materiales. Por esta razón viene la idea de desarrollar un prototipo que permita hacer un estudio de la salud estructural, tanto en situaciones catastróficas como en situaciones diarias, así como el paso de vehículos por las diferentes avenidas de nuestra ciudad, y esto va generando una debilitación en la estructura.

Para esto se desarrollará un prototipo basándose en una red de sensores inalámbricos que consta de dos nodos principales y dos nodos secundarios. Su construcción y comunicación inalámbrica se fundamenta en las normas IEEE 802.15.4. Y 1451.5.

El prototipo estará compuesto por un Arduino nano que será el encargado del almacenamiento de los datos que recoja el módulo de vibración SW-420 que será el sensor que detectará toda vibración generada por sismos o por otras circunstancias.

Basándose en las normas IEEE 802.15.4. Y 1451.5 para la construcción de una red de sensores inalámbricos y para la transmisión de datos que se guardaran en una base de datos SQLite con la ayuda del lenguaje de programación Python para su procesamiento y Matlab para su análisis

comparativo mediante gráficas establecidas en estándares internacionales.

Year	Profession	Students	Director of Technical Project	Technical Project
2020	Electronic Engineer	Wilson Alberto Cárdenas Sánchez	PhD. David Barrios	Design and implementation of a prototype using a wireless sensor network for a building monitoring system using free software and Matlab

ABSTRACT

This project arises after the tragedy, which bore the Ecuador on 16 April of 2016 where an earthquake caused human and material losses. For this reason, the idea of developing a prototype that allows us to make a study of the structural health, both in catastrophic situations as in everyday situations, such as the passage of vehicles by the different avenues of our city, and this is generating a weakening is the structure of the constructions.

For this will be developed a prototype based on a wireless sensor network that consists of a main node and two child nodes. Its construction and wireless communication is based on the IEEE 802.15.4. And 1451.5.

The prototype will consist of an Arduino Nano that will be in charge of the storage of the data collected by the SW-420 vibration module which will be the sensor that will detect any vibration generated by moss or other circumstances.

Based on IEEE 802.15.4 standards. And 1451.5 for the construction of a network of wireless sensors and for the transmission of data that will be stored in a SQLite database with the help

of the Python programming language for processing and Matlab for comparative analysis using graphs established in international standards.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	El Problema	2
1.1.1.	Planteamiento del Problema	2
1.1.2.	Importancia y alcances.....	3
1.2.	Delimitación y formulación del problema	4
1.2.1.	Delimitación temporal	4
1.2.2.	Delimitación espacial	4
1.2.3.	Delimitación académica	4
1.2.4.	Formulación del problema.....	4
1.3.	Objetivos de la investigación	5
1.3.1.	Objetivo general.....	5
1.3.2.	Objetivos específicos.....	5
2.	MARCO TEORICO	5
2.1.	Tipos de edificios.....	5
2.1.1.	Edificio con estructura de acero	6
2.1.2.	Edificio con estructura de concreto prefabricado	6
2.1.3.	Edificio con estructura de muros soportantes de ladrillo.....	7
2.1.4.	Edificio con estructura soportante de madera	8
2.1.5.	Edificio con Estructura Metálica Prefabricada	8
2.1.6.	Edificio con estructura de placas o paneles de polietileno.....	9
2.2.	Clasificación de los edificios.....	10
2.2.1.	Calidad de las Edificaciones	11
2.3.	Mantenimiento de edificios	14
2.3.1.	Clasificación del mantenimiento en edificios	14
2.3.2.	Mantenimiento de edificios con estructuras de acero	15
2.3.3.	Vida útil de edificios.....	16
2.4.	Factores que producen el colapso de la estructura de un edificio	17
2.4.1.	Cimientos débiles.....	17
2.4.2.	Materiales no resistentes.....	18
2.4.3.	Error de los trabajadores	19
2.4.4.	Factores climáticos.....	20

2.4.5.	Agua	20
2.4.6.	Viento.....	20
2.4.7.	Temperatura	20
2.5.	Monitoreo de salud estructural.....	21
2.6.	Características del monitoreo de salud estructural.....	22
2.7.	Análisis de salud estructural en edificaciones	22
2.8.	Sistemas antisísmicos en edificios	23
2.8.1.	Sistema de control pasivo de vibración	23
2.8.2.	Sistema de control activo de vibración.....	24
2.8.3.	Diferencia entre sistema de control pasivo y sistema de control activo.....	24
2.8.4.	Sistema semiactivo.....	24
2.9.	Clasificación del Daño en Estructuras	25
2.9.1.	Daño Lineal.....	25
2.9.2.	Daño no lineal	25
2.10.	Clasificación del daño estructural por niveles	26
2.11.	Las vibraciones	27
2.12.	Medición de vibraciones en estructuras.....	28
2.12.1.	Análisis en términos de frecuencia	28
2.12.2.	Análisis en términos de tiempo	28
2.13.	Modos de vibración en edificios	29
2.13.1.	Primer modo	30
2.13.2.	Segundo modo	30
2.13.3.	Tercer modo.....	30
2.14.	Normas utilizadas para el análisis de vibraciones.....	30
2.14.1.	Norma Suiza SN 640 315a de 1992	31
2.14.2.	Norma Internacional ISO 4866.....	31
2.14.3.	Norma Escocia – Pan 50.....	33
2.14.4.	Norma Alemana (DIN4150).....	34
2.15.	Arduino.....	35
2.15.1.	¿Para qué sirve Arduino?	36
2.15.2.	Tipos de Arduino	36
2.16.	Arduino Nano.....	37
2.17.	Módulo Xbee S2c	38
2.18.	Xbee USB Adapter	39
2.19.	Arduino Nano IO Shield 1.0.....	39
2.20.	Módulo ADXL335	40

2.21.	Módulo Sw-420	41
2.22.	Matlab	42
2.23.	Arduino IDE	43
2.24.	Python	43
2.24.1.	Ventajas de Programar en Python	44
2.25.	SQLite	45
2.25.1.	Características de SQLite.....	45
2.26.	Norma IEEE 802.15.4.....	46
2.27.	Norma IEEE 1451.5.....	47
2.28.	Protocolo ZigBee	47
2.28.1.	Tipos de nodos Zigbee	49
2.29.	Redes Inalámbricas	50
2.29.1.	Tipos de redes inalámbricas.....	51
2.29.2.	Ventajas de las redes inalámbricas.....	53
2.29.3.	Desventajas de las redes inalámbricas	54
2.30.	Red de Sensores Inalámbricos (WSN).....	54
2.30.1.	Modelo de adquisición de datos.....	55
2.30.2.	Constitución de la red de sensores inalámbricos (WSN)	56
2.30.3.	Topología de una red de sensores inalámbricos.....	56
3.	MARCO METODOLOGICO	58
3.1.	Metodología de la investigación	58
3.1.1.	Investigación bibliográfica documental	58
3.1.2.	Método experimental	58
3.1.3.	Método científico.....	59
3.2.	Técnicas de investigación.....	59
3.2.1	La entrevista.....	59
3.2.2	La observación	59
3.3.	Propuesta de solución.....	60
3.4.	Técnicas para la detección de daños en edificios	61
3.4.1.	Técnica de rigidez de base (Escobar Sánchez, Ramsés Rodríguez).....	63
3.4.2.	Descomposición en el dominio de la frecuencia	64
3.4.3.	Rigidez de base.....	65
3.5.	Técnica de minería o recolección de datos.....	67
3.5.1.	Detección de daños con análisis de Clusters	68
3.5.2.	Detección de daños con bosques aleatorios	69
3.5.3.	Detección de daños basados en el cambio de frecuencias.....	69

3.5.4.	Detección de daños basados en sus características dinámicas	70
3.6.	Vida útil de los edificios	71
3.6.1.	Estimación de la vida útil en edificios	72
3.6.2.	Método por factores la norma ISO 15686	73
3.7.	Estrategias para la construcción del prototipo	75
3.7.1.	Método de conexión inalámbrica del prototipo.....	77
3.8.	Diseño de la red del prototipo	78
3.9.	Nodos sensoriales	80
3.10.	Nodo coordinador.....	81
3.11.	Programación en Python.....	83
3.12.	Almacenamiento en la base de datos SQLite.....	83
3.13.	Visual Studio Code	84
3.14.	Matlab en el análisis de datos.....	85
3.15.	Construcción del prototipo	86
3.15.1.	Ensamblaje de los nodos coordinadores	86
3.15.2.	Ensamblaje de los nodos sensoriales.....	87
3.16.	Configuración de los módulos Xbee S2C.....	89
4.	ANALISIS DE RESULTADOS	91
4.1.	Funcionamiento y ejecución del software del proyecto.....	91
4.1.1.	Ejecución del software Python y SQLite.....	92
4.1.2.	Cambio de ruta y procesamiento de datos con Matlab.....	93
4.1.3.	Esquema estructural de la interfaz gráfica	94
4.1.4.	Interfaz gráfica de la aplicación del prototipo	95
4.2.	Pruebas realizadas con el prototipo.	96
4.3.	Análisis y recolección de datos analógicos-digital	98
4.4.	Análisis y recolección de datos digital-digital	101
	CONCLUSIONES.....	103
	RECOMENDACIONES.....	104
	Bibliografía.....	105
	ANEXOS.....	108
	Presupuesto.....	108
	Cronograma Actividades.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Edificio con Estructura de Acero.....	6
Figura 2.2 Edificio con Estructura de Concreto.....	7
Figura 2.3 Edificio con Estructura Soportantes de Ladrillo.....	7
Figura 2.4 Edificio con Estructura Soportante de Madera.....	8
Figura 2.5 Edificio con Estructura Metálica Prefabricada.....	9
Figura 2.6. Edificio con Estructura de placas o paneles de polietileno.....	9
Figura 2.7 Colapsó un edificio en una zona residencial en abril.	18
Figura 2.8 Los trabajadores usan métodos antiguos.	19
Figura 2.9 Uso de andamios de bambú en construcciones a gran escala.....	19
Figura 2.10 Esquema general de un sistema de MSE ante sismos.....	21
Figura 2.11 Torre Mayor Ciudad de México.....	23
Figura 2.12 Puente Tsing Ma de Hong Kong.....	25
Figura 2.13 Clasificación del daño por niveles.....	27
Figura 2.14 Análisis en Frecuencia y Tiempo de las Vibraciones.....	29
Figura 2.15 Modos de vibración de un edificio.	29
Figura 2.16 Interfaz del software Arduino.....	35
Figura 2.17 Estructura del funcionamiento de Arduino.....	36
Figura 2.18 Modelos de Placas Arduino más utilizadas.....	37
Figura 2. 19 Arduino Nano.....	38
Figura 2.20 Módulo XbeeS2c.....	38
Figura 2.21 Módulo xbee Usb Adapter.....	39
Figura 2.22 Módulo Nano IO Shield 1.0.....	40
Figura 2.23 Módulo ADXL335.....	40
Figura 2.24 Módulo Sw-240.....	41
Figura 2.25 Matlab.....	42
Figura 2.26 Software Arduino IDE.....	43
Figura 2.27 Interfaz del lenguaje de programación Python.....	44
Figura 2.28 Logo de SQLite.....	45
Figura 2.29 Esquema de Trabajo del Protocolo IEEE 802.15.4.....	46
Figura 2.30 Área de acción del Protocolo Zigbee.....	48
Figura 2.31 Topología de los nodos Zigbee.....	49
Figura 2.32 Clasificación de las Redes Inalámbricas.....	50
Figura 2.33 Esquema de una Wlan en un hogar.....	51
Figura 2.34 Diagrama de una conexión Wimax.....	52
Figura 2.35 Diagrama de una Red WWAN.....	53
Figura 2.36 Esquema de adquisición de Datos de una WSN.....	55
Figura 2.37 Topología de una Red de Sensores Inalámbrica.....	56
Figura 3.1 Estructura de la propuesta de solución.....	61

Figura 3.2 Detección de daño por análisis de clúster	68
Figura 3.3 Operación de las redes inalámbricas	76
Figura 3.4 Método de conexión inalámbrica en estrella	77
Figura 3.5 Diagrama de bloques del prototipo de monitoreo.....	78
Figura 3.6 Diseño de la red y estructura virtual del prototipo de monitoreo	79
Figura 3.7 Estructura física de la red del prototipo de monitoreo.....	79
Figura 3.8 Estructura virtual de conexión del nodo sensorial	80
Figura 3.9 Elementos del nodo sensorial	81
Figura 3.10 Estructura virtual del nodo coordinador	82
Figura 3.11 Elementos del nodo coordinador	82
Figura 3.12 . Interfaz del lenguaje de programación Python	83
Figura 3.13 Configuraciones de SQLite con Python	84
Figura 3.14 Interfaz de Visual Studio Code.....	84
Figura 3.15 Sintaxis de comunicación entre Matlab y SQLite	85
Figura 3.16 Piezas del nodo coordinador 1	86
Figura 3. 17 Ensamblaje del nodo coordinador 1	87
Figura 3. 18 Piezas del nodo sensorial 1	87
Figura 3. 19 Ensamblaje del nodo sensorial 1	88
Figura 3. 20 Funcionamiento del nodo sensorial 1	88
Figura 3. 21 Interfaz de configuración de los módulos Xbee S2C.	89
Figura 3. 22 Prueba de envío de mensajes los Xbee	90
Figura 3. 23 Prueba de recepción de mensaje de los Xbee.	90
Figura 4.1 Ejecucion de archivos Python con Visual Code	91
Figura 4.2 Programación del prototipo en Python con la interfaz de Visual Code.....	92
Figura 4.3 Transmisión y lectura de datos del prototipo.....	92
Figura 4.4 Base de datos creada con el registro de los sensores	93
Figura 4.5 Cambio de ruta de archivos del proyecto	94
Figura 4.6 Esquema estructural de la interfaz gráfica.....	95
Figura 4.7 Interfaz gráfica del prototipo	96
Figura 4.8 Montaje del nodo sensorial en la pared de la estructura	96
Figura 4.9 Nodo sensorial en alto	97
Figura 4. 10 Recepción de datos mediante el nodo coordinador	97
Figura 4. 11 Función pulseIn en Arduino para recolectar datos de forma análoga	98
Figura 4. 12 Recolección de datos de forma análoga con Python	98
Figura 4. 13 Procesamiento general en Matlab de los datos analógicos recolectados por el nodo sensorial	99
Figura 4. 14 Datos de pulsos de vibración en tiempo de real.....	99
Figura 4. 15 Señal modulada libre de ruido	100
Figura 4. 16 Análisis de los datos analógicos con la tabla de frecuencia de la norma Pan50- Escocia.....	100
Figura 4. 17 Recolección de datos de forma digital con Python	101
Figura 4. 18 Procesamiento de los datos de manera digital.....	101

Figura 4. 19 Datos de vibración en tiempo real digitalizados	102
Figura 4. 20 Análisis de los datos digitales con la tabla de frecuencia de la norma Pan50- Escocia	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Calidad de la edificación.....	11
Tabla 2.2 Calidad de la edificación según su clasificación.....	12
Tabla 2.3 Encuesta Anual de Edificaciones 2009; Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC)	15
Tabla 2.4 Normativas suizas de vibraciones	31
Tabla 2.5 Normativas ISO 4866 de vibraciones	32
Tabla 2.6 Valores de velocidad de partícula y tipos de daños en la norma PAN50	33
Tabla 2.7 Valores de frecuencia norma alemana DIN4150	34
Tabla 3.1 Movimientos sísmicos en Ecuador.....	62
Tabla 3. 2 Estimación de vida útil de diseño (VUD).....	73
Tabla 3. 3 Factores para la estimación de la vida útil del edificio de la UPS.....	74

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del país y del mundo entero, en ámbitos de construcciones civiles, ha sido un pilar fundamental para el incremento de la economía. Cada año alrededor del mundo se construyen proyectos arquitectónicos que conllevan un alto grado de ingeniería. De la misma forma con el paso del tiempo existen construcciones que ya llegan a los años de vida útil.

El deterioro de estas construcciones se debe a varios factores que afectan su estructura. Los edificios están sometidos a vibraciones provocadas por sismos, paso de vehículos pesados o algún otro factor natural que van provocando daños con el paso del tiempo en las bases.

Según el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), Ecuador soportó desde el año 2016 hasta el año 2018 la cantidad de 17.811 movimientos sísmicos, siendo el del 16 de abril del 2016 el que provocó un colapso en el país, dejando estructuras totalmente colapsadas y otras con daños severos.

En este trabajo de titulación se propone el desarrollo de una red de sensores inalámbricos y el diseño de un prototipo a bajo costo para el monitoreo de salud estructural, es decir, poder monitorear la estructura de una casa, de un edificio, etc.

En el capítulo 1 de este trabajo se detalla una descripción del problema y las soluciones que se proponen para resolverlos. Se declaran los objetivos a cumplir en el desarrollo del trabajo.

En el capítulo 2 se elabora toda la parte teórica del proyecto y se fundamenta todas las áreas conceptuales que relacionan al trabajo. En el capítulo 3 se menciona la metodología utilizada en la investigación. Se provee cumplir y desarrollar toda la parte técnica del prototipo. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto

1.1. El Problema

1.1.1. Planteamiento del Problema

El sismo más fuerte que soportó el Ecuador en los últimos 10 años fue el del 16 de abril del 2016 que dejó aproximadamente 668 personas fallecidas y pérdidas materiales por más de 3.300 millones de dólares.

Se evidenció el daño de grandes edificaciones civiles. Sumado a esto otro factor que incide en el deterioro de las construcciones son los vehículos que mediante su circulación por las calles generan vibraciones que provocan que las estructuras con el paso del tiempo sufran daños en sus bases y procedan a debilitarse.

Según el INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) el Ecuador incrementó en un 57% su tasa vehicular en los últimos 5 años. Considerando estos problemas, se analizó que en el país no existe la tecnología ni el estudio para analizar o monitorear estructuras civiles por los altos costos de equipos y la falta de conocimiento del tema.

Por este motivo en base a los conocimientos adquiridos en la Universidad Politécnica Salesiana en la carrera de Ingeniería Electrónica se analizó la idea de crear un proyecto que ayude al uso de estas tecnologías en nuestro país para así poder obtener información de posibles daños generados en edificios debido a sismos ocurridos en los últimos años o por vibraciones provocadas por el paso de vehículos.

Por ello la creación de un prototipo que utilizará una red de sensores inalámbricos que mediante la obtención de ondas de vibración nos dará información que nos permitirá evaluar el estado de estas construcciones.

1.1.2. Importancia y alcances

En vista de los percances naturales que han venido ocurriendo en el país y el incremento de la tasa vehicular, se analizó la necesidad de tener una herramienta que nos permita conocer el estado de ciertas construcciones. Se ha propuesto desarrollar un prototipo para la implementación de un sistema de monitoreo de estructuras civiles mediante una red de sensores inalámbricos, para impedir incidentes o accidentes asociados a la inseguridad del movimiento de la estructura ocasionado por la falta de mantenimiento, mala construcción o tiempo de vida útil de las estructuras.

La red que opera en el protocolo IEEE 802.15.4 (ZigBee) se forma de cuatro nodos: dos nodos coordinadores y dos nodos sensoriales. Los nodos sensoriales detectan y transmiten inalámbricamente valores de vibración e inclinación de la estructura civil al nodo principal denominado coordinador, el mismo que a través de su puerto serial permite el procesamiento de la información a la interfaz de usuario creada en Matlab y los datos y gráficos en un software libre.

De esta forma esto nos permitirá conocer el daño que han sufrido estas construcciones en los últimos años con los diferentes percances ya mencionados y poder dar una solución para mejoras en futuras construcciones.

El alcance del proyecto será dotar a la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil de un prototipo portable para el monitoreo de estructuras civiles. Con este equipo resultarán beneficiados la Universidad Politécnica Salesiana y especialmente la carrera de Ingeniería Electrónica y sus alumnos, debido a que podrán enriquecer su aprendizaje en varias materias de la carrera como Sensores, Procesamiento Digital de Señales, etc. permitiendo realizar pruebas reales.

1.2. Delimitación y formulación del problema

1.2.1. Delimitación temporal

El tiempo estimado para el desarrollo de este proyecto técnico es de dieciocho meses.

1.2.2. Delimitación espacial

Las pruebas del proyecto se desarrollarán en algún laboratorio perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana. La demostración técnica y funcionamiento se realizara por medio de una maqueta que simule un edificio real y lo que ocurre cuando esta estructura soporta un sismo o algún otro factor que afecte su salud estructural.

1.2.3. Delimitación académica

En la parte académica el proyecto se pone a prueba los conocimientos obtenidos en las diferentes áreas de estudio de la carrera de Ingeniera Electrónica como:

Sistema de microprocesadores, electrónica analógica y digital, señales y sistemas, redes de comunicaciones, propagación.

1.2.4. Formulación del problema

La formulación del problema lo podríamos plantear de la siguiente forma: ¿De qué forma afecta la falta de un prototipo de red de sensores inalámbricos (WSN) para el monitoreo de salud estructural en los diferentes factores que alteran la vida útil de las edificaciones y como se podría determinar el daño y la vida útil de estas estructuras?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab.

1.3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar estudios sobre las diferentes técnicas que existen para la detección de daños y estimación de la vida útil en edificios.
- Implementar estrategias de construcción para la creación de un prototipo de monitoreo mediante métodos de conexión inalámbrica.
- Diseñar un prototipo para el monitoreo de estructuras civiles basándose en las normas IEEE 802.15.4. y 1451.5.
- Implementar el sistema de sensores Xbee S2 y Shield Xbee que pueda monitorear la salud estructural de los edificios.

2. MARCO TEORICO

2.1. Tipos de edificios

La construcción de edificios es una antigua actividad humana, con el fin de crear refugios, por el cual los seres humanos son capaces de adaptarse a una amplia variedad de climas. La historia de la construcción se caracteriza por una serie de tendencias que va de la mano con los diferentes materiales que se utilizaban.

La estructura es el elemento que mantiene en pie un edificio. Por este motivo la empresa (Láminas y Aceros) los clasifica de la siguiente forma.

2.1.1. Edificio con estructura de acero

La figura 2.1 muestra una estructura metálica fabricada con acero para el apoyo interno. Se trata de las construcciones con estructura soportante de acero, entrepisos de perfiles de acero o losas de concreto armado. Estos edificios se utilizan para una variedad de propósitos, incluyendo el almacenamiento, espacio de oficinas o viviendas.



Figura 2.1 Edificio con estructura de acero
Fuente: Empresa Laminas y Aceros

2.1.2. Edificio con estructura de concreto prefabricado

Es una estructura previamente elaborada en una industria con la fusión de materiales resistentes, como se observa en la figura 2.2, es usada en grandes edificaciones. Las armaduras van montadas dependiendo del lugar de arrastre, hace referencia a la fusión de las vigas, columnas y el resto de materiales se encuentren ubicados.

El concreto prefabricado es usado en el ensamblaje de todo tipo de edificaciones que se construyen alrededor del mundo, siendo el material más utilizado para elaborar estructuras que conllevan un alto grado de ingeniería, este material es el elegido por su alto estándar de durabilidad que ofrece a la hora de construir.



Figura 2.2 Edificio con estructura de concreto
Fuente: Blog MOSIngenieros

2.1.3. Edificio con estructura de muros soportantes de ladrillo.

La figura 2.3 muestra muros elaborados en su estructura a base de ladrillos son edificados como divisiones de ambiente, su función será dividir cada ambiente de la construcción. Es fundamental mencionar que la construcción de cada muro debe ir con la cantidad necesaria de mezcla.

La mezcla está elaborada a base de distintos materiales como el agua, cemento y una buena cantidad de arena, la fusión de todo esto da como resultado una pasta consistente para la elaboración de estructuras civiles.

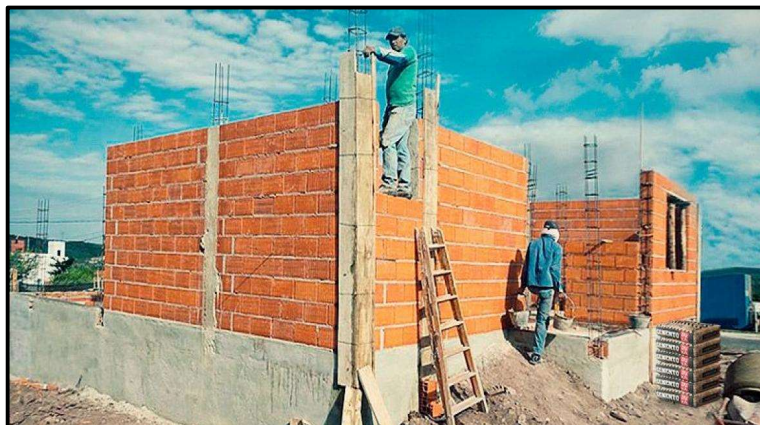


Figura 2.3 Edificio con estructura soportante de ladrillo
Fuente: Blog MOSIngenieros

2.1.4. Edificio con estructura soportante de madera

En la figura 2.4 se muestra las estructuras de madera que se han convertido en un elemento llamativo al momento de construir edificaciones, desde pequeñas casas hasta edificios con acabados de madera resaltando su finura a la hora de realizar acabados. Las construcciones de madera se elaboran con paneles laminados del mismo material junto con vigas o estructuras de gran tamaño para dar una seguridad al beneficiario.



Figura 2.4 Edificio con estructura soportante de madera
Fuente: Maderame.com

2.1.5. Edificio con Estructura Metálica Prefabricada

Es un sistema de construcción fundamentado en el ensamblaje de edificaciones con estructura de hierro y láminas galvanizadas pintadas y rellenas con anime de alta densidad que conforma un “panel sándwich” con excelente aislamiento termo acústico como se observa en la figura 2.5.

El sistema puede ser utilizado en la construcción de diversos tipos de edificaciones tales como viviendas, dispensarios, escuelas, oficinas, etc. Este material se utiliza para dar una estructura completamente metálica tanto en las columnas principales como en las secundarias, esto hace que la construcción pueda tener todo un recubrimiento metálico prefabricado.



Figura 2.5 Edificio con estructura metálica prefabricada
Fuente: Laminas y Acero

2.1.6. Edificio con estructura de placas o paneles de polietileno

Esta estructura se desarrolla mediante placas de polietileno revestidas por sus dos lados como se observa en la figura 2.6. El revestimiento está elaborado con rejillas de acero y vigas corrugadas del mismo material que están enlazadas por medio de uniones.

Las placas de polietileno y concreto armado son usadas para la creación de muros, cubiertas y otros elementos. El sistema se puede combinar con otro tipo de materiales y adaptarse a cualquier tipología constructiva, desde viviendas unifamiliares hasta edificios de gran altura.

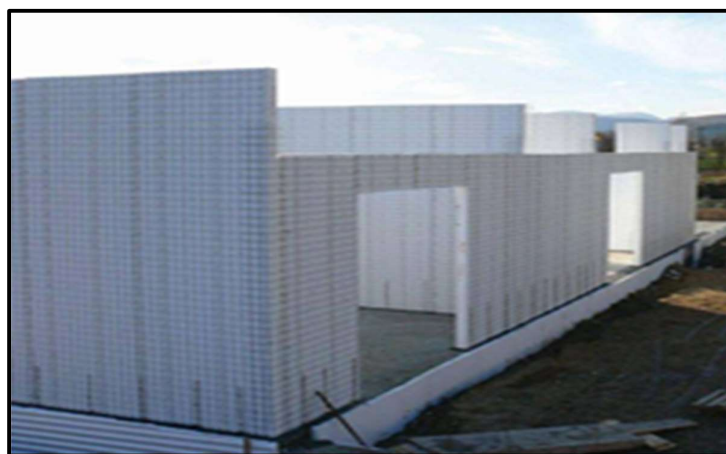


Figura 2.6. Edificio con estructura de placas o paneles de polietileno
Fuente: Laminas y Aceros

2.2. Clasificación de los edificios

Se pueden clasificar por su calidad en cuanto a la edificación como fue construida y el uso de sus materiales usados para el desarrollo de la misma, se presenta la siguiente clasificación.

- A.** Construcciones con esqueleto soportante de acero. Entrepisos de perfiles de acero o losas de hormigón armado.
- B.** Construcciones de estructura resistente de hormigón armado, incluidas aquellas en que las armaduras son de hierro de perfiles. Entrepisos de los de hormigón armado.
- C.** Construcciones con muros soportantes de albañilería de ladrillo o bloque de concreto entre cadenas y pilares de hormigón armado. Construcciones de hasta 4 pisos. Entrepisos de losas de hormigón armado. Sin embargo, podrán ser de madera los del piso más elevado en los edificios de 2 y 3 pisos. Los cielos de los pisos más elevados podrán ser de losa de hormigón armado o entramado de madera.
- D.** Construcciones con muros soportantes de albañilería de piedra, entre pilares y cadenas de hormigón armado. Construcciones hasta de dos pisos.
- E.** Edificios con estructura de madera. Se incluye en esta clasificación las construcciones de tabiquería de adobe (estructura soportante de madera)
- F.** Edificios de adobe, tierra-cemento o materiales livianos aglomerados con cemento (escoria, piedra pómez, etc.). La fachada puede ser de albañilería de ladrillo.
- G.** Estructura metálica panel exterior madera corriente; interior madera corriente o aglomerada, volcánica o similar.
- H.** Estructura de madera en forma de “A” en que la prolongación de la techumbre forma los paramentos laterales.

2.2.1. Calidad de las Edificaciones

Se clasifican según la siguiente Tabla 2.1 mostrada a continuación.

Subíndice	Calidad de la Edificación
1	Superior
2	Media Superior o Buena
3	Media o Corriente
4	Media Inferior
5	Inferior o Mínima

Tabla 2.1 Calidad de la edificación
Fuente: Academia.edu

La calidad de las edificaciones tradicionales y prefabricadas se califican con un subíndice atendiendo a la mayor o menor complejidad de la estructura y a la calidad de las terminaciones.

Su calidad se mide desde un índice superior siendo este el valor más alto en cuanto acabados que se le puede dar a la construcción y un índice inferior, siendo este último el que muestra en sus acabados un término poco elegante a la vista del consumidor, todo esto siguiendo un proceso de calidad en la edificación de la estructura.

El Control de Ejecución de la obra se realiza durante la construcción del edificio, con el objetivo de conseguir una calidad global del producto, y se puede desglosar en tres apartados

- El realizado por los técnicos directores de obra.
- El que se lleva a cabo según el programa y proyecto de control de calidad realizado normalmente por el arquitecto técnico o aparejador.
- El que realiza la constructora a través de ficha.

La tabla 2.2 muestra los valores de edificación por m², según calidad y clasificación de la edificación:

Tipo de edificación										
Calidad	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	125.619	143.288	125.619	125.619	89.299	-	-	-	-	-
2	93.242	105.988	93.242	93.242	66.726	47.113	66.726	60.849	47.113	73.610
3	68.700	78.511	68.700	68.700	49.065	34.349	49.065	44.154	34.349	54.000
4	49.065	55.926	49.065	49.065	35.301	24.520	35.301	31.414	24.520	38.261
5	-	-	26.497	-	26.497	18.632	28.451	25.513	19.627	30.406

Tabla 2.2 Calidad de la edificación según su clasificación
Fuente: Academia.edu

Calidad Superior en índice 1

Para estos efectos se consideran los siguientes aspectos

- A. Techumbre: Pendientes superiores a las necesarias, ejecutadas con fines estéticos.
- B. Aleros: Superiores a un metro.
- C. Distancia entre muros: Luces superiores a 3.5 metros espacios de grandes ventanales.
- D. Altura de piso a cielo: Superior a lo normal (2.40 m), en el caso de viviendas. La altura normal de otras construcciones deberá considerarse en función de su destino.
- E. Sobre cimientos: Notoriamente más alto que los normales (0.30m), salvo aquellos que ha sido necesario realizar obligadamente, para salvar desniveles de hasta 0.5m.
- F. Diseño: Complejo o irregular.
- G. Diferentes niveles de piso: Entre algunos recintos.

Calidad media superior buena en índice 2

Se entiende por aquella que presenta algunas de las características especiales de diseños y construcción señalada para localidad superior, cuenta con instalaciones y terminaciones en su mayoría corrientes, pero posee algunas de mayor calidad.

Calidad media o corriente en índice 3

Corresponde a una edificación de planificación corriente caracterizada principalmente por su sencillez de diseño (rectangular), terminaciones normales en una construcción media y de tipo corriente, como por ejemplo revestimiento exterior de revoque de cemento y arena.

Calidad media inferior en índice 4

Implica sencillez de diseño y construcción corresponde a viviendas o construcciones similares con terminaciones de tipo económico. Por ejemplo, piso de linóleo, ventanas y puertas de madera, fierro o aluminio tipo económico.

Calidad inferior o mínima en índice 5

Corresponde al concepto de vivienda mínima básica o aquella que se define como etapas iniciales, que son utilizadas para residente de obra en construcción, cuentan con un solo compartimiento o un solo ambiente las viviendas construidas o que entran dentro de este tipo son contenedores en buen estado que son acoplados para ser habitados mientras dura la construcción.

Sus elementos estructurales son sus apoyos verticales y su estructura de techumbre, su estructura no compromete construcciones interiores o subterráneas. Su altura interior es generalmente superior a la de una construcción tradicional

2.3. Mantenimiento de edificios

El mantenimiento es la tarea que garantiza la prolongación de la vida útil de las edificaciones, al evitar que con el deterioro queden inutilizables. Las características del mantenimiento y las reparaciones están en función de la tipología de la edificación en sí y se relaciona estrechamente con la época de construcción y los materiales que se emplearon en su ejecución (Arancibia, 2008).

El proceso de deterioro de una edificación se debe a la interacción de ésta con el medio, ya que éstas se ven degradadas por elementos ambientales como cambios de temperatura, luz solar, humedad ambiental, lluvia, además del uso mismo a través del tiempo (Quintana, 2004).

2.3.1. Clasificación del mantenimiento en edificios

A la hora de hablar del mantenimiento de edificios se clasifica en dos, el preventivo y el correctivo, a continuación se detalla una introducción de los mantenimientos mencionados.

Mantenimiento preventivo

Es una actividad destinada a evitar gastos mayores en los edificios, especialmente en aquellos casos donde se han realizado grandes inversiones. Busca prevenir que se den fallas y deterioros en las estructuras, cuyo costo de reparación es más elevado una vez que se presenten. También el mantenimiento preventivo busca alargar la vida útil de las obras civiles, y mejorar aspectos como la estética y salubridad de las edificaciones (García, 2002).

El objetivo del mantenimiento preventivo es evitar que se produzcan fallas tempranas en los elementos que componen un edificio. Las edificaciones pueden llegar a su vida útil esperada si se les brinda un mantenimiento de forma adecuada.

Mantenimiento correctivo

Se refiere a realizar acciones solamente cuando se presentan fallas o el deterioro de la estructura es avanzado y se ha hecho visible, causando molestias a los ocupantes del edificio. En muchos de los casos el costo de realizar la actividad de reparación o sustitución es elevado, debido a que muchas de las correcciones que se realizan se pudieron prever y evitar.

Esta acción no es planificada, sino que responde a una necesidad, producto del uso mismo de la estructura y a su interacción con el medio ambiente.

2.3.2. Mantenimiento de edificios con estructuras de acero

Según la Encuesta Anual de Edificaciones realizada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), la cantidad de edificaciones con estructura de acero existente a nivel de país por el año 2009 se puede visualizar en la siguiente Tabla 2.3 que muestra el porcentaje de edificaciones por material utilizado en la estructura, según las Provincias del Ecuador.

	ESTRUCTURA PREDOMINANTE					
	Total	No Aplica	Hormigón Armado	Metálica	Madera	Otros
NACIONAL	25840	1380	23457	867	81	55
01 AZUAY	2586	31	2408	132	2	13
02 BOLIVAR	264	1	257	5	0	1
03 CAÑAR	702	1	680	17	0	4
04 CARCHI	313	0	301	6	0	6
05 COTOPAXI	819	0	801	17	0	1
06 CHIMBORAZO	705	0	690	13	0	2
07 EL ORO	1458	7	1430	21	0	0
08 ESMERALDAS	392	0	343	42	6	1
09 GUAYAS	5587	864	4698	24	1	0
10 IMBABURA	1353	2	1280	64	1	6
11 LOJA	1404	24	1297	83	0	0
12 LOS RIOS	806	59	666	81	0	0
13 MANABI	1735	16	1710	8	1	0
14 MORONA	212	1	196	10	5	0
15 NAPO	349	1	287	60	1	0
16 PASTAZA	235	2	197	25	7	4
17 PICHINCHA	2.898	3	2.688	186	6	15
18 TUNGURAHUA	1.242	1	1.208	33	0	0
19 ZAMORA	265	0	258	5	2	0
20 GALAPAGOS	265	10	255	0	0	0
21 SUCUMBIOS	409	1	394	7	6	1
22 ORELLANA	161	1	157	3	0	0
23 SANTO DOMINGO	639	1	626	11	0	1
24 SANTA ELENA	1.041	354	630	14	43	0

Tabla 2.3 Encuesta Anual de Edificaciones 2009; Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) Unidad de Procesamientos; Dirección de Estudios Analíticos Estadísticos (DESAE); Galo López Lindao.

2.3.3. Vida útil de edificios

Al momento de diseñar nuestros edificios, los arquitectos e ingenieros debemos conocer y partir de una vida útil de diseño, es decir, un tiempo de referencia durante el cual esperamos que la construcción permanecerá sin necesidad de realizar un mantenimiento correctivo muy costoso que se aleje del presupuesto original (International Standards Organization, 2000; Hernández, 2012).

Es muy importante tomar en cuenta esta vida útil, ya que va a determinar, en muchas ocasiones, el tipo de materiales y sistemas de construcción que debemos emplear y sobre todo los elementos arquitectónicos constructivos para evitar la degradación y el deterioro de estos, y así mejorar la durabilidad del edificio. Entendemos durabilidad como la capacidad que tiene el edificio para soportar el deterioro y alcanzar la vida útil estimada (Canadian Standards Association, 2001).

Por otro lado, los constructores de edificios tampoco suelen contemplar el uso del método de ISO 15686 (cuya norma se forma a su vez de un compendio de 11 apartados más) que, en síntesis, sirve para determinar y estimar la vida útil y durabilidad de un edificio (Hernández, 2010).

Existen, además, códigos de construcción, como el del ACI 318, que recomiendan el uso de unos materiales en función de ciertos factores estructurales y ambientales. Esto puede ser muy útil al momento de diseñar un edificio con fines de durabilidad y salud estructural.

El uso adecuado de materiales con una calidad certificada y una mano de obra garantizada con experiencia dará cierto valor de durabilidad por la vida útil de diseño de la estructura.

2.4. Factores que producen el colapso de la estructura de un edificio

Está claro que un terremoto puede hacer que se derrumbe un edificio, sobre todo en zonas del mundo donde no hay estructuras antisísmicas. La ausencia de mantenimiento es una de las principales causas del deterioro de un edificio.

Pero no siempre eventos extremos como los movimientos telúricos son la causa de los desplomes. Construcciones poco adecuadas o bien errores y descuidos de los encargados de erigir las edificaciones pueden ser también los responsables.

Un edificio puede derrumbarse cuando el peso que lleva dentro es mayor que el que puede soportar el edificio. Existen algunos problemas comunes entre las causas del colapso de edificios.

2.4.1. Cimientos débiles

Construir cimientos adecuados puede ser costoso. Puede valer hasta la mitad del precio de un edificio, según observa el profesor de ingeniería civil, Anthony Ede, de la Universidad de Ota, Nigeria.

Ede afirma que dos cosas que deben ser fundamentales cuando se está realizando la base de la construcción: la solidez del suelo y el peso del edificio junto a su contenido correspondiente darán una idea clara acerca de la edificación.

Pero según el profesor, los constructores intentan ahorrar dinero que debe asignarse a los cimientos, como por ejemplo en terrenos pantanosos como en la ciudad de Lagos, donde muchos edificios se han desplomado como se observa en la figura 2.7 incluso en tierras firmes, las bases tienen que ser lo suficientemente sólidas para soportar el peso de la edificación.



Figura 2.7 Colapsó un edificio en una zona residencial en abril.
Fuente: Getty

2.4.2. Materiales no resistentes

Puede suceder que los materiales que se utilizan en las obras no sean lo suficientemente resistentes para contener la carga.

En África, por ejemplo, se registraron tantos colapsos de edificios que llevaron a la Organización Africana de Normalización (OAN) a llevar a cabo reuniones mensuales para discutir por qué tantas construcciones se derrumban.

Y desde la entidad advierten sobre la existencia de mercados que venden materiales falsificados o que se utiliza chatarra en lugar de acero para las edificaciones. Incluso hay casos de falsificadores que adulteran certificados de autenticación o que los mismos contratistas emplean, a sabiendas, materiales incorrectos para ahorrar costos.

Los problemas en la construcción no terminan ahí, continúan cuando los trabajadores usan métodos que no dan una garantía a la manipulación de los materiales, métodos antiguos que ya no se usan en la actualidad, esto hace que exista un desequilibrio en el porcentaje de materiales al momento de realizar las diferentes mezclas como se puede ver en la figura 2.8.



Figura 2.8 Los trabajadores usan métodos antiguos.
Fuente: Getty

2.4.3. Error de los trabajadores

En la figura 2.9 se puede observar como los trabajadores usan técnicas antiguas como andamios contruidos por bambú y esto es una fuente de accidentes como dice el profesor Ede. Además, Ede acusa a los contratistas de emplear a trabajadores no calificados porque son más baratos y de esta manera ahorran dinero.

O también los obreros entienden mal las proporciones de mezcla del concreto y usan carretillas en lugar de los medidores adecuados para calcular la cantidad de cemento.



Figura 2.9 Uso de andamios de bambú en construcciones a gran escala
Fuente: Getty

2.4.4. Factores climáticos

El transcurso del tiempo, acompañado con las condiciones climáticas, influye en gran parte en el envejecimiento de un edificio. El clima afecta a los materiales empleados para su construcción y su calidad se ve mermada con el paso del tiempo. Por ello, antes de llevar a cabo cualquier construcción debe estudiarse detenidamente el entorno.

Mirar alrededor ayuda a no cometer errores y poder realizar construcciones eficientes en el tiempo con los materiales y las formas más adecuadas.

2.4.5. Agua

El agua es un factor muy influyente en el deterioro de edificios. Humedades o pequeñas filtraciones del agua de la lluvia o por capilaridad pueden hacer que un edificio envejezca de forma rápida.

2.4.6. Viento

El viento juega un papel trascendental en los edificios de más de 20 metros de altura. Es por ello que antes de la construcción se realizan informes y estudios sobre la acción del viento en dicha construcción.

Este fenómeno puede producir vibraciones que afecten a elementos estructurales de un edificio y al confort de los habitantes que se encuentran en él.

2.4.7. Temperatura

Los cambios de temperatura también afectan considerablemente a los edificios. Con el calor, los materiales usados se dilatan y crecen, por lo que, una construcción siempre debe contar con juntas de dilatación para esos centímetros que se ganan. Con el frío, los materiales usados se contraen y reducen su tamaño.

Como ocurre con el resto de los factores, el entorno en el que se construye determina el tipo de obra que se lleve a cabo. Que exista una gran estabilidad térmica es una noticia ideal para cualquier constructor ya que los materiales no se ven afectados y su deterioro es mucho menor.

2.5. Monitoreo de salud estructural en edificios

En la actualidad los sistemas de monitoreo de salud estructural están diseñados mediante una herramienta no destructiva que localizan las posibles alteraciones en cualquier construcción civil, como son grietas en su estructura o la falta de resistencia de la estructura.

Esta tecnología permite monitorear la estructura a cierta distancia y obtener datos en tiempo real como se observa en la figura 2.10 se lo realiza por medio de facultades de indagación paramétricos y no paramétricos, de esta manera se adquiere las bandas de vibración de la estructura con el amortiguamiento, todo esto gracias a señales de vibración que son detectadas por los sensores que están localizados en la estructura que va a ser analizada.

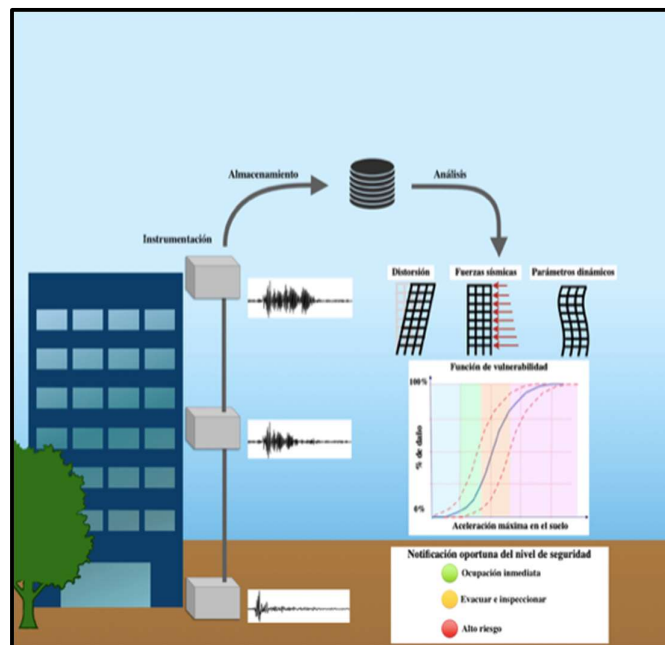


Figura 2.10 Esquema general de un sistema de MSE ante sismos

Fuente: <https://blog.vise.com.mx/>

Con un sistema de monitoreo de salud estructural se puede detectar problemas ocasionados por vibraciones, fuerte impacto del viento, humedad y malos asentamientos. Todo esto con el fin de minimizar los gastos de corrección y mantenimiento que pueda presentar la edificación en su vida útil.

2.6. Características del monitoreo de salud estructural

La manera correcta de monitorear salud estructural es con un ensamblaje de una red de sensores en la estructura, los sensores obtienen información los cuales los guarda en una base de datos para su procesamiento y posterior análisis.

Este sistema de monitoreo presenta características a bajo costo que permiten el estudio de la edificación.

- Funcionamiento en distintas estructuras.
- No modifica los detalles externos del edificio.
- Tecnología construida con sensores analógicos y digitales que están adaptados para soportar cargas de corriente, la intemperie y cambios de temperatura.
- El software analiza la información obtenida por los sensores localizados en la estructura (sensores de temperatura, deformación, inclinación, etc.), y con esa recolección de información se elabora un análisis de salud estructural.

2.7. Análisis de salud estructural en edificaciones

Analizar la salud estructural de las edificaciones mediante el uso de acelerómetro y sensores que registran datos para ser analizados con técnicas informáticas, mediante el empleo de Big data y métodos de aprendizaje profundo, permite el desarrollo de un sistema antisísmico de control semiactivo que busca disminuir la vibración de las construcciones.

Este análisis consiste en observar el daño de las construcciones mediante un sistema de monitoreo estructural de las edificaciones, que emplea el reconocimiento estadístico de patrones de datos, para evaluar la salud estructural de los edificios.

2.8. Sistemas antisísmicos en edificios

A nivel internacional, para evitar daños estructurales durante un movimiento telúrico se emplean dos sistemas antisísmicos:

2.8.1. Sistema de control pasivo de vibración

Este sistema funciona como un aislador sísmico y es ampliamente utilizado en edificios de ciudades con riesgos sísmicos. En la Ciudad de México, la Torre Mayor cuenta con este sistema como se puede observar en la figura 2.11.



Figura 2.11 Torre Mayor Ciudad de México

Fuente: arquirografico.com

2.8.2. Sistema de control activo de vibración

Este sistema se usa para mitigar las vibraciones inducidas por el viento o el hombre.

2.8.3. Diferencia entre sistema de control pasivo y sistema de control activo

La diferencia entre estos dos sistemas es que el de control activo de la vibración requiere de energía eléctrica para su funcionamiento y el de control pasivo no la necesita; aunque el de control activo es más efectivo, raramente se utiliza en ciudades con riesgos sísmicos, porque durante un evento telúrico son comunes los cortes del suministro eléctrico.

2.8.4. Sistema semiactivo

Una propuesta alternativa de estas dos opciones es desarrollar un sistema de control semiactivo de la vibración en las construcciones, que pueda monitorear las propiedades estructurales y su salud; originalmente esta propuesta se ha aplicado a puentes grandes, pero es posible adaptarla a edificios elevados de zonas con alta sismicidad.

Un sistema de control semiactivo normalmente requiere una pequeña fuente de energía externa para su funcionamiento y utiliza el movimiento de la estructura para desarrollar la fuerza de control, donde la magnitud de la fuerza puede ajustarse mediante una fuente de energía externa.

El puente Tsing Ma de Hong Kong que se observa en la figura 2.12, está equipado con un control semiactivo, que cuenta con 350 acelerómetros y sensores medidores de tensión que transmite los datos de las edificaciones a un centro informático que los procesa y analiza para evaluar las condiciones físicas y funcionales de la estructura.



Figura 2.12 Puente Tsing Ma de Hong Kong
Fuente: Megaconstrucciones.net

2.9. Clasificación del Daño en Estructuras

El daño en una estructura puede ser clasificado de dos maneras: lineal y no lineal.

2.9.1. Daño Lineal

El daño puede clasificarse como lineal cuando inicialmente la estructura permanece de manera elástica-lineal (que aún no alcanza su punto de fractura) y después de un año permanece de la misma manera. Estos daños provienen de los cambios en las propiedades materiales de la estructura, pudiendo ser identificados mediante el uso de algún tipo de método.

2.9.2. Daño no lineal

Es definido como el caso en donde inicialmente la estructura se encuentra de manera elástica-lineal y luego de que el daño se hace presente, se comporta de una manera elástica-no lineal, por causa de una ruptura que se abre y se cierra tras sufrir vibraciones. Para determinar el tipo de daño (lineal o no lineal) que sufre una estructura, se requiere de la utilización de algún método. Estos métodos pueden ser clasificados en tres categorías:

- **Basados en modelos.** - Se asume que la estructura monitoreada responde de una manera determinada de acuerdo con ciertas restricciones, tanto operativas como de entorno. Para construir el modelo se utilizan métodos numéricos como el análisis de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés), tal como en las teorías de Euler Bernoulli o Timoshenko para el modelado de vigas.
- **Basados en datos.** - Estos métodos, basan su funcionamiento en monitorear a la estructura para obtener datos experimentales sujetos a condiciones, tales como vibraciones, deformaciones, fatigas, ya sea en tamaño real o en un prototipo a escala.
- **Híbridos.** - Un enfoque menos conocido pero que se ha utilizado son los métodos híbridos, los cuales basan su funcionamiento en la combinación de modelos matemáticos, así como métodos basados en datos.

2.10. Clasificación del daño estructural por niveles

De la misma forma, se puede clasificar el daño en una serie de niveles o etapas, que van desde la detección del daño, hasta la predicción del tiempo de vida de la estructura y los riesgos que puede correr la edificación por más pequeño que sea el daño.

El proceso de detección de daño puede ser clasificado en el Nivel 1, Nivel 2 o Nivel 3 para esto observar la figura 2.13, ya que estos niveles se relacionan con las pruebas dinámicas de aceleración, velocidad y problemas de modelado que se puedan obtener al realizar el respectivo monitoreo de salud estructural para determinar de qué nivel puede llegar a sufrir el daño la edificación monitoreada.

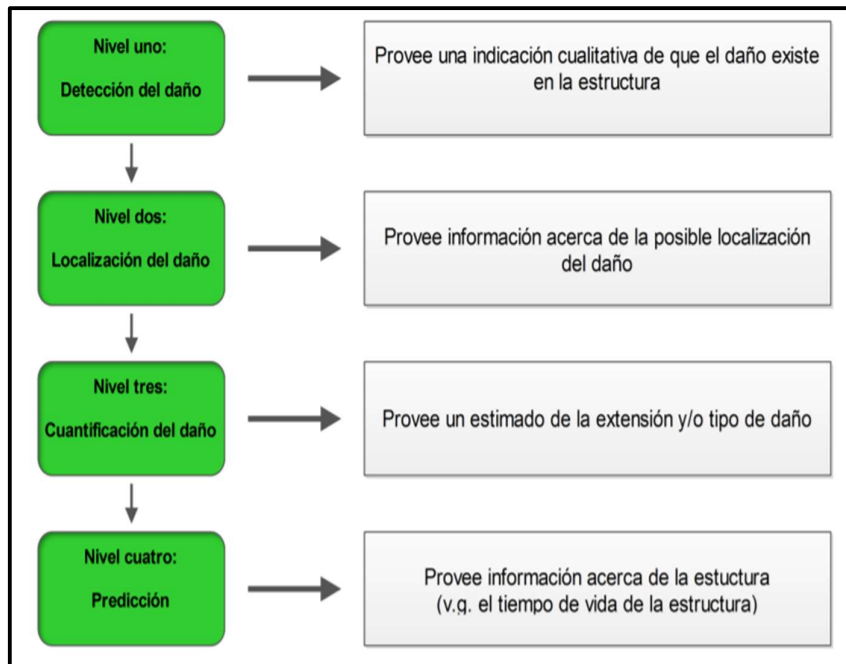


Figura 2.13 Clasificación del daño por niveles
Fuente: Trabajo titulación Salvador Villegas

2.11. Las vibraciones

El fenómeno producido por un fuerte movimiento de manera de oscilación en forma circular es conocido como vibración. El movimiento se presenta en diferentes parámetros como intensidad del movimiento, el periodo de duración y la frecuencia de oscilación.

Las vibraciones se rigen bajo dos conceptos fundamentales para su análisis que son la frecuencia y la intensidad del movimiento.

La intensidad con la que una estructura recibe una vibración puede tener cambios bruscos y esto ser causante de daños irreparables en la estructura, todo esto se puede medir mediante la frecuencia de operación que presenta las vibraciones que sufre la estructura, esta frecuencia se la analiza con frecuencias ya definidas por estándares utilizados para la medición de niveles de vibración.

2.12. Medición de vibraciones en estructuras

Para obtener los datos de vibración de una estructura se lo realiza mediante sensores colocados en sitios específicos de la estructura, que permitan realizar un correcto monitoreo de salud estructural y así detectar las fallas de dicha edificación.

Uno de los factores más importantes al momento de recolectar los datos de medición de los sensores es el contacto físico del sensor con la estructura, esto permitirá obtener información precisa, manteniendo los protocolos de envío y recepción de datos el tiempo de retardo que pueda tener esta conexión, todo esto para tener una correcta frecuencia de operación.

Con la información de los valores se realiza una comparación entre la frecuencia de vibración de la estructura con otros estándares establecidos como se menciona en escritos anteriores.

2.12.1. Análisis en términos de frecuencia

Las bases del análisis en términos de frecuencia en las ondas de vibración obtenidas en el monitoreo estructural. Está conformada por una gráfica de análisis que tiene por un eje vertical y otro horizontal como se observa en la figura 2.14, en estos ejes se mide parámetros de relación de frecuencia vs desplazamiento, velocidad o aceleración esto facilita la interpretación de los datos de una forma más rápida y entendible.

2.12.2. Análisis en términos de tiempo

Analizar en términos de tiempo es la verificación del análisis en frecuencia, muestra y permite confirmar los daños ocurridos en la estructura, sus resultados son parecidos y estos daños pueden ser por holgura, grietas finas o largas.

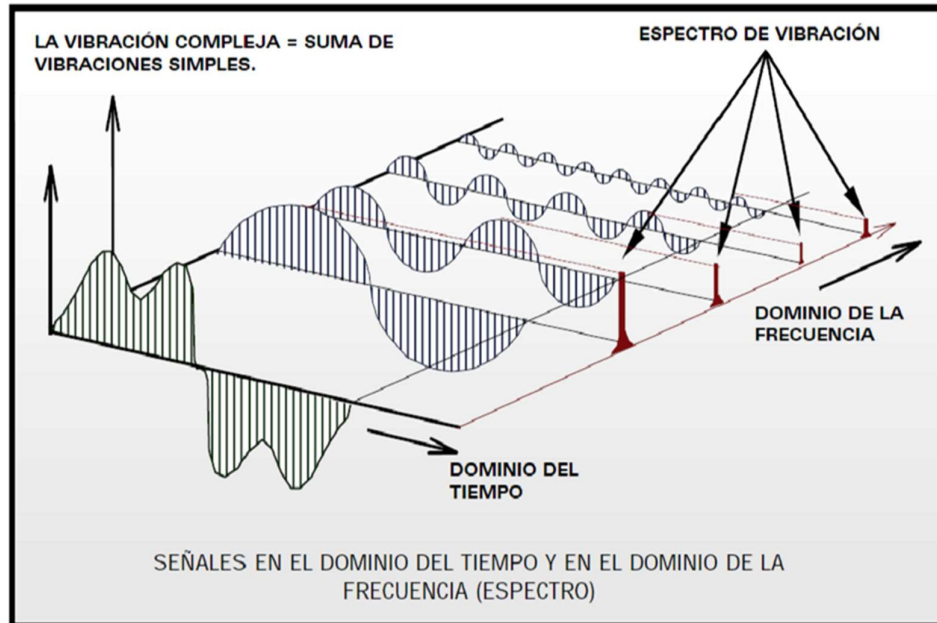


Figura 2.14 Análisis en frecuencia y tiempo de las vibraciones
Fuente: <http://www.energiza.org/>

2.13. Modos de vibración en edificios

Los edificios, al igual que todos los cuerpos materiales, poseen distintas formas de vibrar ante cargas dinámicas que, en la eventualidad de un terremoto, pueden afectar la misma en mayor o menor medida. Estas formas de vibrar se conocen como modos de vibración para esto véase la figura 2.15.

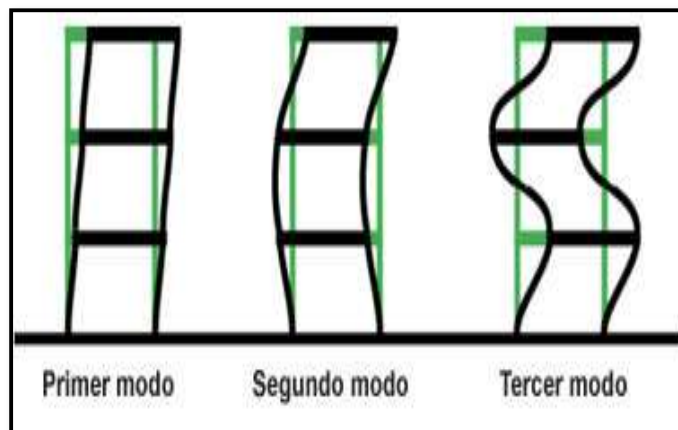


Figura 2.15 Modos de vibración de un edificio.
Fuente: <https://www.wbdg.org/>

2.13.1. Primer modo

En la forma más básica, las estructuras oscilan de un lado hacia otro. Esto es lo que se conoce como el modo fundamental o modo 1. Un ejemplo de este modo de oscilación es el edificio del Banco Nacional de Costa Rica, uno de los más altos de aquel país. Esta estructura oscila de un lado hacia otro cada 2.2 segundos aproximadamente.

2.13.2. Segundo modo

El movimiento en la base es mucho menor que en la parte superior. Cuando ocurre un sismo, este movimiento de vibración de la estructura se ve incrementado. Esto produce que la gente en pisos superiores perciba un movimiento mayor que la gente ubicada en pisos inferiores, principalmente cuando los sismos ocurren a gran distancia o profundidad. Esto se ubica dentro del modo 2.

2.13.3. Tercer modo

El movimiento de la estructura es mucho más intenso en las bases, esto produce una vibración muy intensa en la parte en donde se unen las columnas y los entrepisos de un edificio. Este tercer modo produce una gran debilitación en la estructura.

2.14. Normas utilizadas para el análisis de vibraciones

Para un análisis del comportamiento de las vibraciones en estructuras, se utilizan normas desarrolladas y establecidas por organismos de control, estas normas están establecidas en términos de frecuencia de operación de las vibraciones con estos datos se estructuran tablas con los siguientes parámetros que veremos posteriormente.

2.14.1. Norma Suiza SN 640 315a de 1992

El estándar suizo como se observa en la tabla 2.4 se desarrolló para medir las vibraciones causadas por: el paso de vehículos, trabajo de maquinaria y voladuras que suelen ocasionar pequeños daños en la estructura. Este estándar registra frecuencias desde 8Hz hasta un pico máximo de 150Hz para frecuencias mayores se las analiza mediante otros estándares internacionales.

Tabla 2.4 Norma Suiza SN 640 315a de 1992	
Campo de aplicación.....	Vibraciones por voladuras, maquinaria, equipo de construcción, tráfico en carreteras y ferroviario.
Variables medidas.....	Velocidad resultante-de partícula-pico [mm/s], frecuencia de la vibración [Hz] relacionada con la componente de máxima velocidad, adicionalmente la cantidad de sacudidas.
Valores indicativos.....	De acuerdo a tablas extras.
Sensores utilizados.....	Tres componentes ortogonales de sensores que registren velocidad en mm/s con un rango lineal entre 5 y 150 Hz
Ubicación sensores.....	Sobre la estructura
Fortalezas.....	Brinda criterios para definir daño no estructural- fisuras en mampostería-. Define una frecuencia de las sollicitaciones

Tabla 2.4 Normativas suizas de vibraciones
Fuente: <https://osso.org.co/>

2.14.2. Norma Internacional ISO 4866

Este estándar fue elaborado por ISO (Organización Internacional para Estandarización) mediante un departamento técnico que tenía como estudio las vibraciones mecánicas y choque.

El estándar ISO está diseñado para regir los inicios básicos de formulación y desarrollo de señales, con el propósito de establecer y analizar las causas de vibraciones en edificaciones, véase la tabla 2.5 que forman los parámetros de la Norma ISO 4866.

Los niveles de vibración en la norma ISO tienen como fundamento cuatro características que sirven para localizar los daños en las estructuras los cuales se hace mención a continuación:

1. Localizar en la estructura donde se presentan las vibraciones, y proceder a realizar un análisis estructural para descartar posibles daños en la construcción.
2. Sistema de control que busca obtener los máximos niveles de vibración establecidos y que han sido enviados a algún ente de control.
3. Reglamentos dinámicos establecidos en el desarrollo estructural para la elaboración de mediciones ocurridas por vibraciones.
4. Evaluación, los aspectos necesitan mucho más estudio para un mejor desarrollo investigativo.

Tabla 2.5 Norma Internacional ISO 4866	
Campo de aplicación.....	Vibraciones en general (voladuras, tráfico, hincado, maquinaria, etc.) excluyendo vibraciones acústicas.
VARIABLES MEDIDAS.....	Depende del campo de aplicación, pero en general aceleración o velocidad, frecuencia y duración de la oscilación.
Valores indicativos.....	No aplica.
Sensores utilizados.....	Recomienda acelerómetros o sensores que midan velocidad (geófonos), dependiendo del tipo de aplicación.
Ubicación sensores.....	En el suelo cerca de estructuras sometidas a vibraciones y dado el caso sobre la estructura.
Fortalezas.....	Son lineamientos muy generales basados en principios básicos, que sirven de guía en el momento de elaborar una norma o al realizar un trabajo en el área de vibraciones.
Debilidades.....	No provee valores indicativos.

Tabla 2.5 Normativas ISO 4866 de vibraciones
Fuente: <https://osso.org.co/>

Una de las citas más importantes de la norma ISO hace mención al tiempo que duran las vibraciones, este fundamento se aplica en todas las investigaciones a ser desarrolladas porque es un problema relevante.

2.14.3. Norma Escocia – Pan 50

Publicada en el 2000 fue desarrollada en Escocia, hace referencia para su creación al estándar BSI (British Standard Institute) BS-6472 de 1992 y BS-7385 sobre la medición y efectos de 1993, que se refiere a todos los componentes que afectan la estructura.

Los componentes que afectan la estructura según la norma Pan 50 están:

- Vibraciones del suelo.
- Coacción de aire.
- Estruendos.
- Polvaredas.
- Movimiento por obras de construcción.

Estos daños que provocan las vibraciones en las estructuras se ven reflejados en la tabla 2.6 donde nos indica en un rango de frecuencias de operación de la norma Pan 50 y los daños provocados.

Tabla 2.6 Norma Escocia – Pan 50		Valores Indicativos(mm/s)		
Tipo de daño	Características	<4 Hz	4 - 15 Hz	> 15 Hz
Cosmético	Formación de grietas finas, crecimiento de grietas existentes en estuco, paredes delgadas o mortero.	15	20	50
Menor	Formación de grietas largas, pérdida o caída de superficies de estuco, grietas en bloques de concreto y ladrillo.	30	40	100
Estructural	Daño en elementos estructurales.	60	80	200

Tabla 2.6 Valores de velocidad de partícula y tipos de daños en la norma PAN50
Fuente: Tomado de Scottish Executive (2000)

2.14.4. Norma Alemana (DIN4150)

Esta norma proporciona los límites de velocidad de las partículas de vibración en mm/s, teniendo en cuenta el tipo de estructura civil y el rango de frecuencia en Hz (Bacci et al., 2003).

Las tres clases de construcciones que define la norma DIN 4150 son:

- Edificios industriales.
- Viviendas y edificios.
- Los monumentos y construcciones delicadas.

Las frecuencias se analizan en tres intervalos: menor de 10 Hz, entre 10 y 50 Hz y entre 50-100 Hz. La norma establece que para frecuencias superiores a 100 Hz la estructura soporta altos niveles de vibración.

La representación gráfica de los valores de velocidad máximos permitidos y las frecuencias para los tres tipos de construcciones se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Norma Alemana (DIN4150)				
Tipos de estructuras	Frecuencia (Hz)			Pisos altos edificios Cualquier frecuencia
	<10	10 – 50	50 - 100	
Industrial	20 mm/s	20 - 40 mm/s	40-50mm/s	40 mm/s
Viviendas y Edificios	5 mm/s	5 - 15 mm/s	15-20 mm/s	15 mm/s
Edificios particularmente delicados	3 mm/s	3 – 8 mm/s	8-10 mm/s	8 mm/s

Tabla 2.7 Valores de frecuencia norma alemana DIN4150

Fuente: www.geosis.co

2.15. Arduino

Es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que en su estructura posee un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra. Estos permiten crear conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla.

Los microcontroladores más usados en las plataformas Arduino son:

- El Atmega168
- Atmega328
- Atmega1280
- ATmega8

Arduino nos facilita un software que consiste en un entorno de desarrollo (IDE) como se observa en la figura 2.16, que implementa el lenguaje de programación de Arduino y el bootloader ejecutado en la placa.

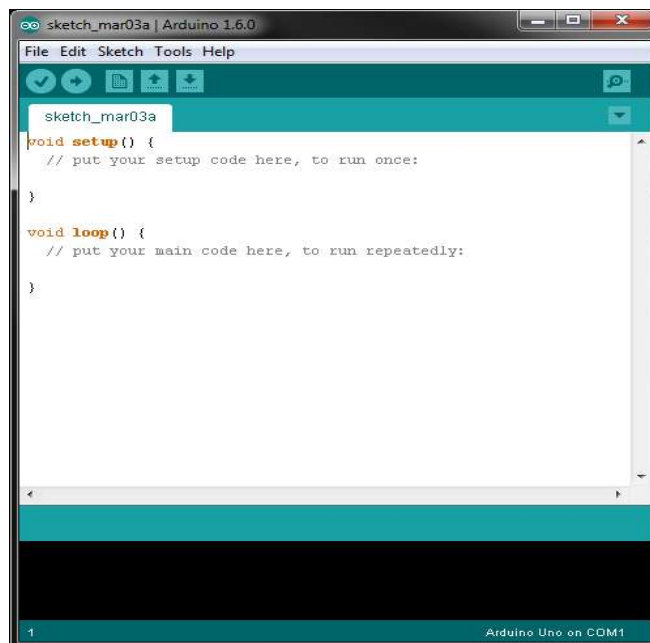


Figura 2.16 Interfaz del software Arduino
Fuente: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/>

2.15.1. ¿Para qué sirve Arduino?

Arduino se puede utilizar para desarrollar elementos propios, conectándose a dispositivos e interactuar tanto con el hardware como con el software. Nos sirve tanto para controlar elementos tanto de entrada como de salida conectados a la placa por medio del microcontrolador de Atmega, gracias a su fácil lenguaje de programación basándose C o C++ se observa la figura 2.17 menciona la estructura del funcionamiento de una placa de arduino.

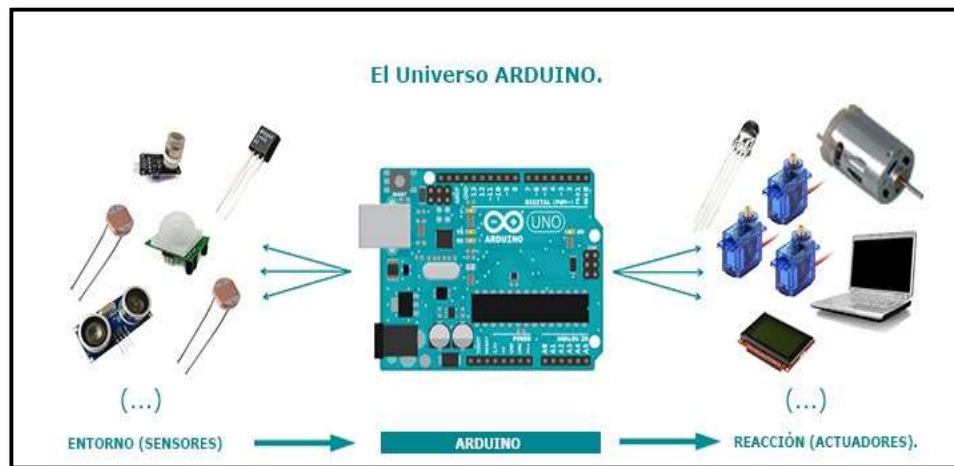


Figura 2.17 Estructura del funcionamiento de Arduino
Fuente: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/>

2.15.2. Tipos de Arduino

Arduino cuenta con un gran número de placas, cada una pensada con un propósito diferente y características variadas como el tamaño físico, número de pines, modelo del microcontrolador, etc. Esto es de gran cobertura porque utiliza la mayoría de sus características de software, como arquitectura, librerías y documentación.

Las placas de Arduino más conocidas para la estructura de proyectos las podemos ver en la Figura 2.18 que se detalle a continuación, donde consta de ocho placas siendo el arduino uno, mega y nano los más usados.

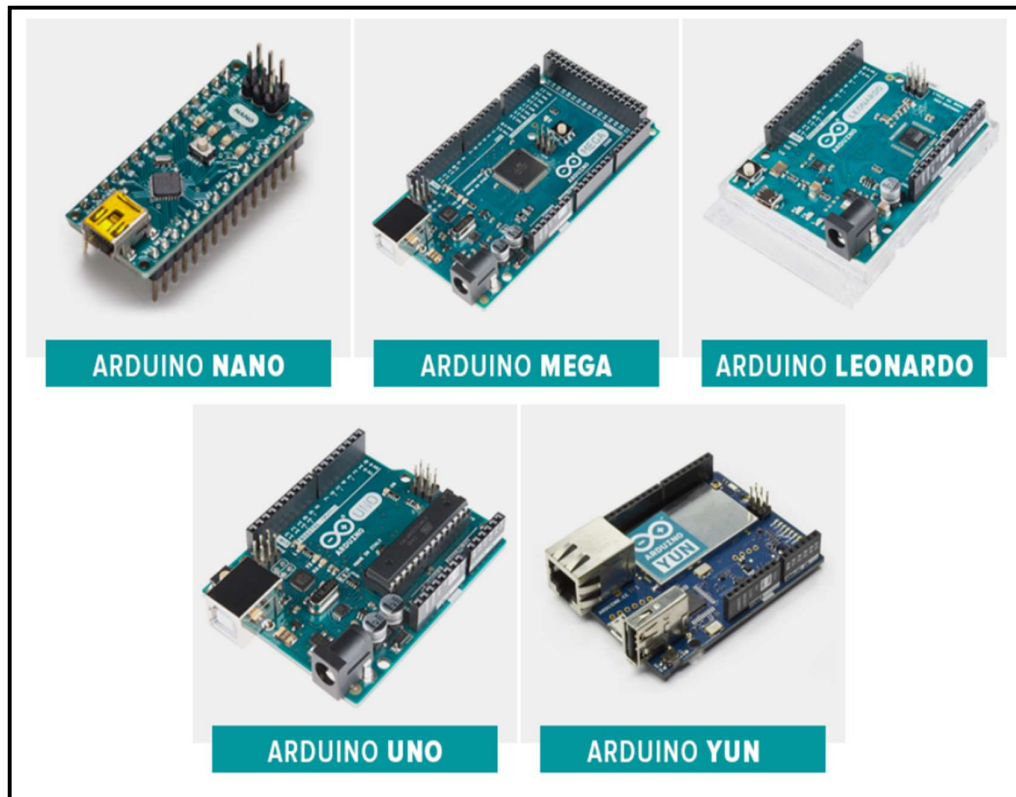


Figura 2.18 Modelos de placas Arduino más utilizadas

Fuente: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>

2.16. Arduino Nano

El Arduino Nano es una placa que fundamenta su desarrollo en el microcontrolador de Atmega328, es de fácil portabilidad y cuenta con un cable USB mini para sus conexiones, esta placa fue desarrollada por su fácil uso al momento de ejecutar proyecto portables de muy poca infraestructura.

Esta placa cuenta con 14 pines de conexión, 6 son usados con PWM, tiene 6 entradas analógicas también posee un cristal de 16Mhz y una entrada USB mini, en el centro tiene un botón de reseteo como se puede observar en la figura 2.19, y a su vez comparte las mismas funciones que otras placas similares como el Arduino UNO.

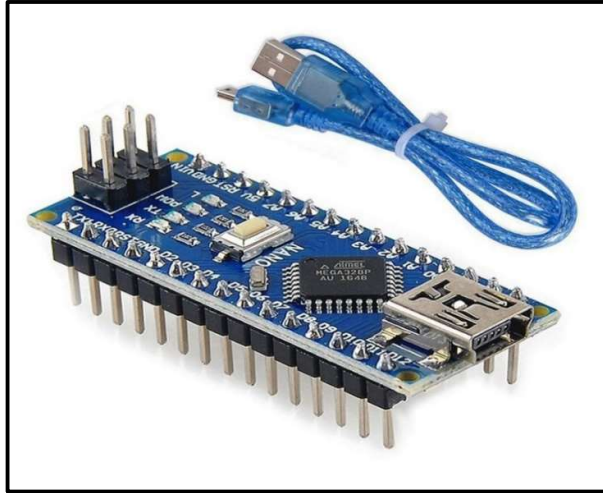


Figura 2.19 Placa del controlador Arduino Nano
Fuente: <https://arduino.cl/arduino-nano/>

2.17. Módulo Xbee S2c

Este módulo desarrollado para ser usado en conexiones inalámbricas, opera bajo el protocolo Zigbee y es muy usado gracias a su bajo costo de operación y su gran alcance.

Al igual que toda la familia de los xbee este módulo se basa en la transmisión SPI (Serial Peripheral Interface) que provee una excelente velocidad en la comunicación entre dispositivos. El módulo xbee logra una comunicación de 60 metros en ambientes cerrados y logra una distancia de 1200 metros en ambientes con línea de vista directa y en óptimas condiciones se puede observar el modulo en la figura 2.20.



Figura 2.20 Módulo XbeeS2c

Fuente: <http://xbee.cl/xbee-zb-s2c-th/>

2.18. Xbee USB Adapter

El Adaptador USB para módulos Xbee Zigbee como se puede ver en la figura 2.21, permite instalar un módulo de comunicaciones Xbee en el zócalo y conectarlo mediante USB a la PC para programarlo mediante el software de inicialización de los nodos.

También permite cargar su programa a través del módulo controlador inalámbrico o realizar una transmisión inalámbrica de datos en tiempo real. El adaptador utiliza un chip convertidor USB-UART FTDI232 para garantizar una transmisión de datos estable y confiable.

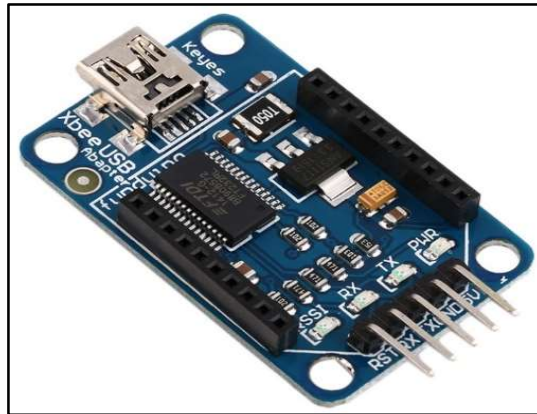


Figura 2.21 Módulo Xbee USB Adapter

Fuente: <https://store.prometec.net/producto/xbee-usb-adapter/>

2.19. Arduino Nano IO Shield 1.0

El Módulo Nano IO es una placa de arranque para Arduino Nano. Rompe todos los pines como la interfaz electrónica de 3 pines de ladrillo, los módulos de la serie Zigbee Xbee y la interfaz inalámbrica nRF24L01 y es compatible con una fuente de alimentación externa de 7-12 V para su correcto funcionamiento.

Este módulo será usado en el desarrollo del proyecto, a continuación se puede observar el modulo Nano IO Shield 1.0 en la figura 2.22.



Figura 2.22 Módulo Nano IO Shield 1.0

Fuente: https://elty.pl/en_US/p/Arduino-Nano-IO-shield-v1.0/150

2.20. Módulo ADXL335

Es un acelerómetro de 3 ejes (X, Y, Z) de bajo consumo de potencia. Mide la aceleración con una escala de $\pm 3G$ y utiliza un nivel de tensión de 3.3 V, se observa al módulo previamente mencionado en la figura 2.23.

También es usado porque permite medir la aceleración de la gravedad estática en aplicaciones de detección de inclinación, así como la aceleración dinámica resultante del movimiento, choque o vibraciones.

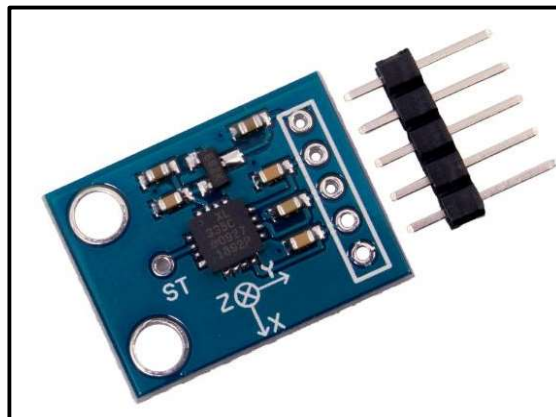


Figura 2.23 Módulo ADXL335

Fuente: <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/adxl335-acelerometro-analogico-3-ejes/>

2.21. Módulo Sw-420

El módulo de vibración cuenta con un OPAMP LM393 y por un resorte en él un pequeño poste en su interior este se activa o cambia cuando registra una vibración que provoca un cambio en su umbral. Posee un potenciómetro tipo preset que está integrado en el módulo que sirve para ajustar la sensibilidad del sensor.

Gracias al comparador LM393 integrado, la tarjeta tiene una salida digital, esta se puede usar para leer a través de una tarjeta de desarrollo (como Arduino) o cualquier microcontrolador en la figura 2.24 se observa el módulo de vibración sw-420.

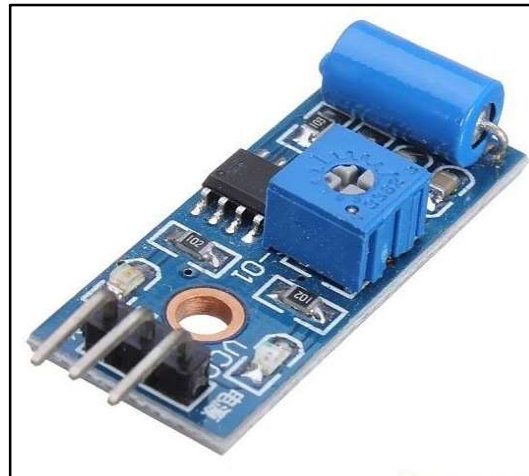


Figura 2.24 Módulo Sw-420

Fuente: <https://sandorobotics.com/producto/hr0214-9/>

1. Si NO es sometido a vibración, el interruptor se encuentra en estado cerrado, es decir en conducción, por lo que la salida se encuentra en BAJO; la luz indicadora roja es activa.
2. Si es sometido a vibración, el interruptor se desconecta al instante, la salida es ALTA, la luz roja se apaga.
3. La salida se puede conectar directamente al microcontrolador para detectar alto y bajo, lo que detecta el entorno de vibración.

2.22. Matlab

Matlab es una herramienta que tiene un lenguaje de programación propio (Lenguaje M) y es multiplataforma (Unix, Windows y Apple Mac Os X) se constituye en matrices para realizar los cálculos matemáticos.

Para los sistemas de control el software Matlab es una herramienta usada en el control de procesos, esta se puede utilizar tanto en simulaciones como en el desarrollo de varios tipos de sistemas de control basados en el tiempo y la frecuencia

Esta plataforma cuenta con diversos paquetes específicos, y de otra manera con funciones que se declaran dentro de su código para ser utilizadas en el desarrollo de múltiples operaciones tanto de cálculos matemáticos como de control de procesos.

En parte académica y en el desarrollo industrial, Matlab es un software completo para el diseño y monitoreo de sistemas de control en la figura 2.25 se puede observar el logo del software Matlab.



Figura 2.25 Matlab

Fuente: <https://www.mathworks.com/>

2.23. Arduino IDE

El software Arduino de código abierto (IDE) es una aplicación multiplataforma que hace que sea más sencillo escribir códigos y subirlos a la placa, la interfaz se la puede observar en la figura 2.26 mostrada a continuación.

Se ejecuta en Windows, Mac OS X y Linux. El entorno está escrito en Java, de esta manera admite los lenguajes C y C++ utilizando reglas especiales de estructuración de códigos. Este software se puede usar con cualquier placa Arduino.

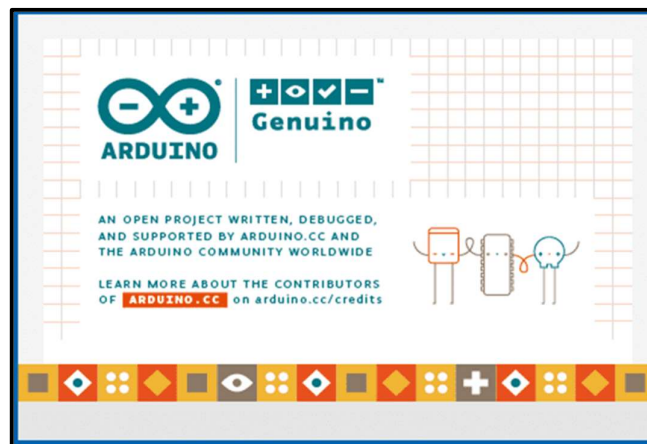


Figura 2.26 Software Arduino IDE

Fuente: <https://ubunlog.com/arduino-ide-en-ubuntu/>

2.24. Python

Este lenguaje de programación es óptimo en el desarrollo de proyectos y en la recolección de datos y su gran versatilidad a la hora de trabajar con Arduino, posee un código entendible y limpio. Es conocido por ser un lenguaje con licencia de código abierto y se puede usar de cualquier manera en el desarrollo de aplicaciones.

Es de mucha ayuda cuando el desarrollador decide trabajar con una múltiple recolección de datos por eso uno de los más empleados en las compañías de Big Data a nivel mundial.

2.24.1. Ventajas de Programar en Python

- **Simplificado y veloz:** Su esquema estructural beneficia la programación y permite un desarrollo más rápido.
- **Fino y flexible:** Ofrece una calidad al programador al ser de muy fácil entendimiento y comprensión
- **Fácil aprendizaje:** Su nivel de entendimiento lo hacen un lenguaje fácil de aprender para los programadores.
- **Portable:** Se lo considera portable, es utilizado especialmente en Big Data y en cualquier ámbito y escenario.
- **Comunidad:** Es uno de los lenguajes que más ha crecido en la cantidad de personas que se han dedicado a utilizarlo para el desarrollo de herramientas tecnológicas su interfaz se la puede observar en la figura 2.27 descrita a continuación.



Figura 2.27 Interfaz del lenguaje de programación Python

Fuente: <https://openwebinars.net/blog/que-es-python/>

2.25. SQLite

Es una herramienta de fácil configuración no posee un servidor fijo, está diseñada para alojar mucha información, se fundamenta en un código abierto, la interfaz del software se puede observar en la figura 2.28.

SQLite está construida en C, lo cual facilita la migración a diversas plataformas de sistemas operativos y de dispositivos. Dado que una base de datos de SQLite se almacena por completo en un solo archivo, está puede ser exportada a cualquier otra plataforma y tener compatibilidad al 100% sin ningún requerimiento de programación adicional o cambios de configuración.

2.25.1. Características de SQLite

Estas son algunas de las características principales de SQLite:

- La base de datos completa se encuentra en un solo archivo.
- Puede funcionar enteramente en memoria, lo que la hace muy rápida.
- Cuenta con librerías de acceso para muchos lenguajes de programación.
- El código fuente es de dominio público y se encuentra muy bien documentado.



Figura 2.28 Logo de SQLite
Fuente: www.ecured.cu › SQLite

2.26. Norma IEEE 802.15.4

Este estándar sirve como referencia técnica al protocolo ZigBee, es usado gracias a una baja tasa de envío de datos, forma parte del desarrollo de las redes inalámbricas y su conectividad mediante esta norma.

El fundamento principal del estándar es brindar una comunicación mediante un enlace entre varios dispositivos todo esto dentro de una red inalámbrica personal (WPAN) que opere a bajo costo. La norma estipula una velocidad de 250kbps como transferencia de datos en una distancia de 10 metros aproximadamente

Su operación se establece en la capa de enlace de datos del modelo OSI como se observa en la figura 2.29, en esta capa se transmite en forma digital mediante valores conocidos como bits, que son impulsos generados de manera electromagnética.

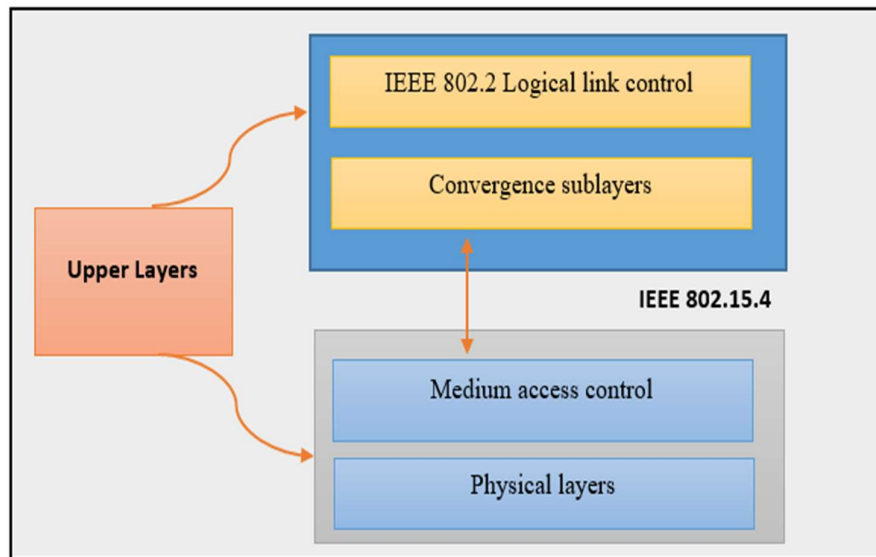


Figura 2.29 Esquema de operación del protocolo IEEE 802.15.4

Fuente: Autor

2.27. Norma IEEE 1451.5

La familia de estándares IEEE 1451 es un grupo de normas de carácter universal y abierto para estandarizar sensores inteligentes teniendo en cuenta tres características fundamentales: integración de la inteligencia cercana al punto de medición, capacidad de cómputo e interfaz digital estándar para transferencia de datos

En octubre de 2007 se aprobó el estándar IEEE1451.5 que será utilizado para el diseño y la comunicación de sensores inalámbricos que define un conjunto de especificaciones para la comunicación entre el Wireless Transducer Interface Module (WTIM). Adopta los populares 802.11, Bluetooth y ZigBee como sus protocolos de comunicación inalámbrica

2.28. Protocolo ZigBee

ZigBee es un protocolo y un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado y creado por la ZigBee Alliance, que es un ecosistema internacional de compañías (Motorola, Philips, Samsung, Honeywell y Siemens entre otras), cuyo objetivo es habilitar redes inalámbricas con capacidades de control y monitoreo que sean confiables, de bajo consumo de energía y de bajo costo.

El protocolo está constituido en la norma IEEE 802.15.4 del área de comunicación inalámbrica (Wireless personal área Newark, WPAN) teniendo como objetivo conexiones que se puedan desarrollar con una mínima tasa de envío de información y una durabilidad en sus baterías, esto genera que se puedan desarrollar proyectos portables por su bajo consumo de energía se pueden usar alimentación externa.

El protocolo ZigBee es una tecnología inalámbrica que opera en las frecuencias ISM (Industrial, Scientific & Medical) de 2,4 GHz, en el continente europeo utiliza la frecuencia de 868 MHz y en Estados Unidos su frecuencia de operación es de 915MHz. Posee la velocidad de transmisión de 250 Kbps en un área de 10 a 75 metros.

Comparte el espectro de frecuencia de operación con tecnologías como Wifi y Bluetooth, esto es debido a su mínimo consumo en enlaces de datos y a características propias del estándar IEEE 802.15.4

ZigBee cubre un área en la que otras tecnologías no desempeñan un buen papel, ya que fueron diseñadas a partir de diferentes requerimientos. Esto lo podemos ver en la figura 2.30 del director de ingeniería de software de Ubilogix, que nos muestra el área de operación del protocolo ZigBee.

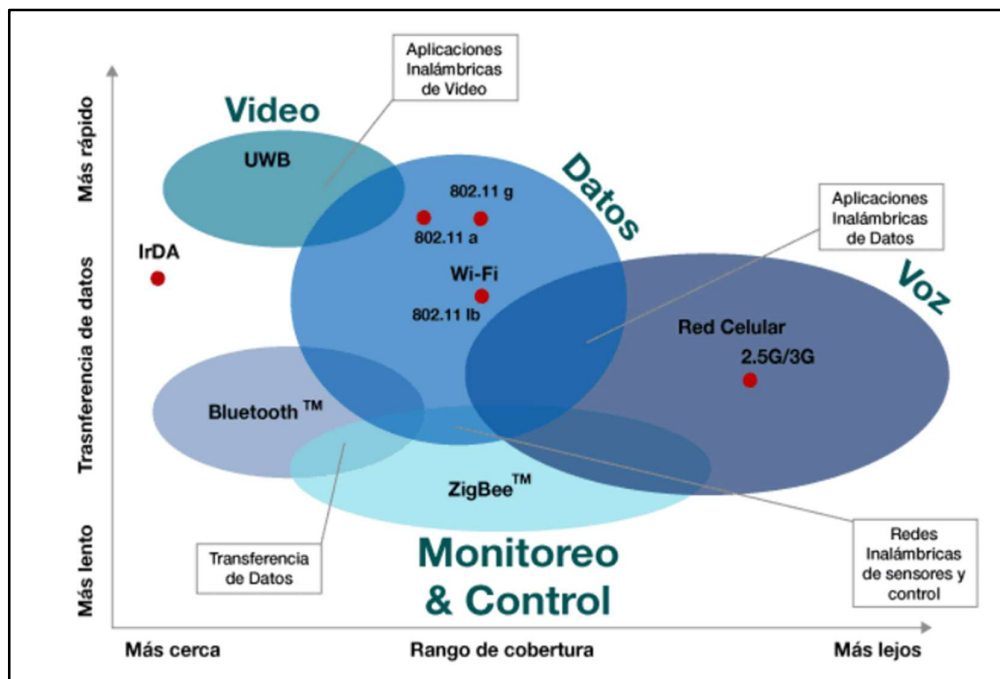


Figura 2.30 Área de acción del protocolo Zigbee
Fuente: Christian P. García director de ingeniería de software de Ubilogix

2.28.1. Tipos de nodos Zigbee

El estándar especifica 3 tipos de nodos que pueden estar en una red: coordinador, ruteador y dispositivo final como se muestra en la figura 2.31.

- **El Coordinador.** - Es el encargado de monitorear la red y sus axiomas de conexión que serán usado para la comunicación.
- **El Reuter.** - Conecta de manera sencilla el nodo coordinador con el dispositivo final siguiendo un estándar de protocolos previos.
- **El Dispositivo final.** - Recolecta toda la información y es enviada mediante la interconexión con el Router y el coordinador, se mantiene en forma pasiva para una larga vida en sus baterías.

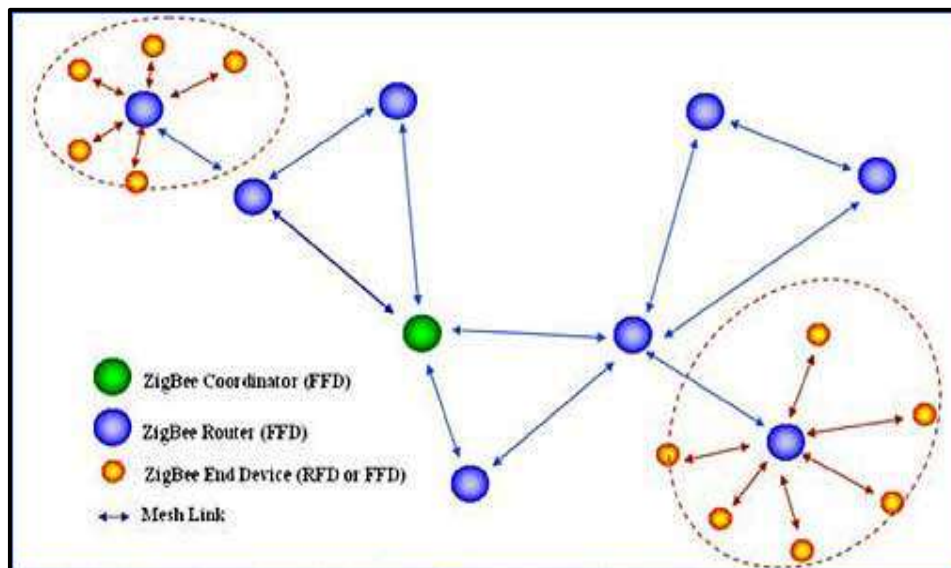


Figura 2.31 Topología de los nodos Zigbee

Fuente: http://www.acenologia.com/correspondencia/redes_sensores_vitiprecision_1209.htm

2.29. Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas son redes que utilizan ondas de radio para conectar los dispositivos, sin la necesidad de utilizar cables de ningún tipo.

También permiten a los dispositivos remotos que se conecten sin dificultad, independientemente que estos dispositivos estén a unos metros o a varios kilómetros de distancia. La infraestructura inalámbrica puede ser construida a muy bajo coste en comparación con las alternativas cableadas tradicionales.

Las redes inalámbricas se pueden clasificar en cuatro grupos específicos según el área de aplicación y el alcance de la señal, La Figura 2.32 ilustra estas categorías donde se utilizara la red WPAN para el desarrollo de este proyecto.



Figura 2.32 Clasificación de las redes inalámbricas.
Fuente: Jordi Salazar, Redes Inalámbricas.

2.29.1. Tipos de redes inalámbricas

- **Redes Inalámbricas de Área Personal (Wireless Personal-Área Networks - WPAN)**

Esta red permite la comunicación en un rango de distancias muy corto, unos 10 metros. A diferencia de otras redes inalámbricas, una conexión realizada a través de una WPAN implica por lo general poca o ninguna infraestructura.

Este tipo de redes se caracterizan por su bajo consumo de energía y también una baja velocidad de transmisión. Se basan en tecnologías como Bluetooth, RFID.

- **Redes Inalámbricas de Área Local (Wireless Local-Area Networks - WLAN)**

Las redes inalámbricas de área local (WLAN) están diseñadas para proporcionar acceso inalámbrico en zonas con un rango típico de hasta 100 metros y se utilizan sobre todo en el hogar, la escuela, una sala de ordenadores, o entornos de oficina véase la figura 2.33.

Esto proporciona a los usuarios la capacidad de moverse dentro de un área de cobertura local. Las WLAN se basan en el estándar 802.11 del IEEE y son comercializadas bajo la marca Wi-Fi.

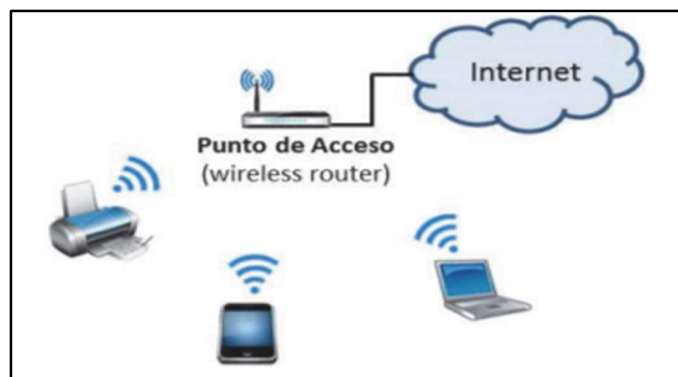


Figura 2.33 Esquema de una Wlan en un hogar

Fuente: Jordi Salazar

- **Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (Wireless Metropolitan-Area Networks - WMAN)**

Las WMAN se basan en el estándar IEEE 802.16, a menudo denominado WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). WiMAX es una tecnología de comunicaciones con arquitectura punto a multipunto orientada a proporcionar una alta velocidad de transmisión de datos a través de redes inalámbricas.

WiMAX opera en dos bandas de frecuencia, una mezcla de banda con licencia y banda sin licencia, de 2 GHz a 11 GHz se usa en aplicaciones sin línea de visión directa, las transmisiones a baja frecuencia no son fácilmente perturbadas por obstáculos y de 10 GHz a 66 GHz, se usa con línea de visión directa esto permite a las torres comunicarse entre sí.

Wimax puede alcanzar velocidades de transmisión próximas a 70 Mbps en una distancia de 50 km a miles de usuarios desde una única estación base.

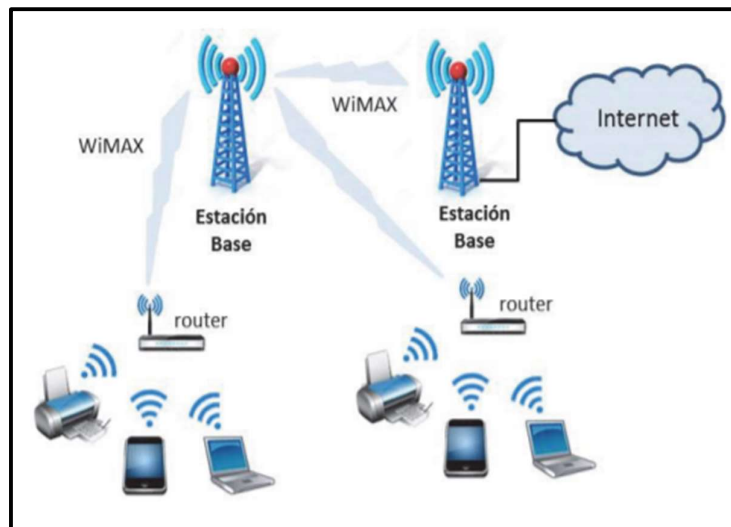


Figura 2.34 Diagrama de una conexión Wimax
Fuente: Jordi Salazar

- **Redes Inalámbricas de Área Amplia (Wireless Wide-Area Networks - WWAN).**

Las redes inalámbricas de área amplia se extienden más allá de los 50 kilómetros y suelen utilizar frecuencias con licencia. Este tipo de redes se pueden mantener en grandes áreas, tales como ciudades o países, a través de los múltiples sistemas de satélites o ubicaciones con antena atendidos por un proveedor de servicios de Internet.

Existen principalmente dos tecnologías disponibles: la telefonía móvil GSM y los satélites GPRS, como se puede observar en la figura 2.35.

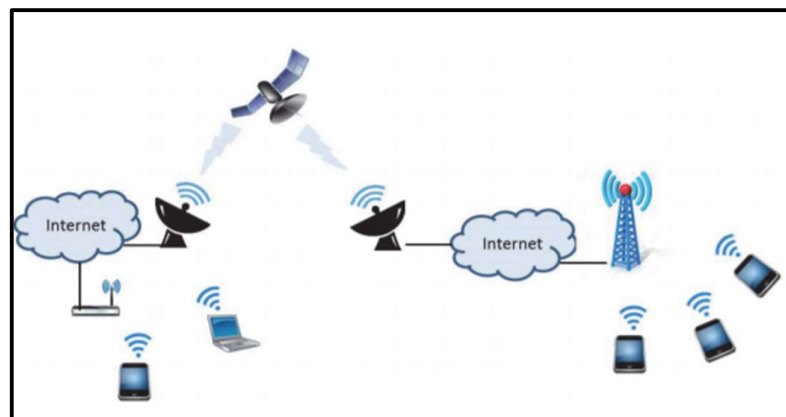


Figura 2.35 Diagrama de una red WWAN
Fuente: Jordi Salazar

2.29.2. Ventajas de las redes inalámbricas

- **Instalación más sencilla y económica:** Es fácil de instalar evita el cableado a por medio de paredes y esto permite a la red llegar a puntos de difícil acceso.
- **Escalabilidad:** Un buen hub (concentrador) inalámbrico deberá soportar aproximadamente 60 usuarios simultáneos, esto permite al administrador expandir su red sin mucho costo solo con simplemente instalar tarjetas inalámbricas en computadoras adicionales e impresoras listas para ser conectadas a la red.

- **Movilidad:** Los dispositivos conectados pueden situarse en cualquier punto dentro del área de cobertura de la red sin necesidad de depender de un cable.
- **Configuración Sencilla:** La persona que se va a conectar a la red sólo tiene que poner el pin de acceso en caso de que se tenga alguna seguridad configurada.

2.29.3. Desventajas de las redes inalámbricas

- **Seguridad:** Los protocolos de seguridad son vulnerables. A los posibles intrusos no les hace falta estar dentro de un edificio o estar conectado a un cable para acceder a la red. Utilizan protocolo WP2 como medio de seguridad.
- **Menor ancho de banda:** El ancho de banda de las redes inalámbricas es menor por eso su tasa de transmisión de datos alcanza velocidades de 54mbps.
- **Interferencias:** La estabilidad de la red se ve afectada por otras ondas electromagnéticas o aparatos electrónicos cercanos, la señal puede verse afectada e incluso interrumpida por objetos, árboles, paredes, espejos, etc.

2.30. Red de Sensores Inalámbricos (WSN)

Establece un desarrollo con bajo costo de operación y un mínimo consumo de energía, su estructura cuenta con nodos tanto coordinador como secundarios que se transmiten información de forma inalámbrica

La estructura de las redes inalámbricas son los nodos de comunicación para enviar y recibir mensajes. Este sistema se utiliza para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión, el movimiento o los contaminantes.

2.30.1. Modelo de adquisición de datos

Para una adquisición de datos los sensores recolectan los datos del escenario a analizar estos datos son tomados en pulsos eléctricos. Existen diversos tipos de sensores para medición como humedad, vibración, inclinación, sonido, afectaciones por el viento etc.

Para entornos de control y análisis como este proyecto basándose en la norma IEEE 1451.5 para la conexión de los sensores o actuadores a un microprocesador y a sistemas de control, y para el diseño de la red mediante nodos de comunicación inalámbrica y transmisión de datos se utilizará la norma IEEE 802.15.4 que permita que los dispositivos se relacionan entre sí a través de una red inalámbrica sencilla con un área de comunicación de 10 metros. Este proceso se observa en a continuación en la figura 2.36.

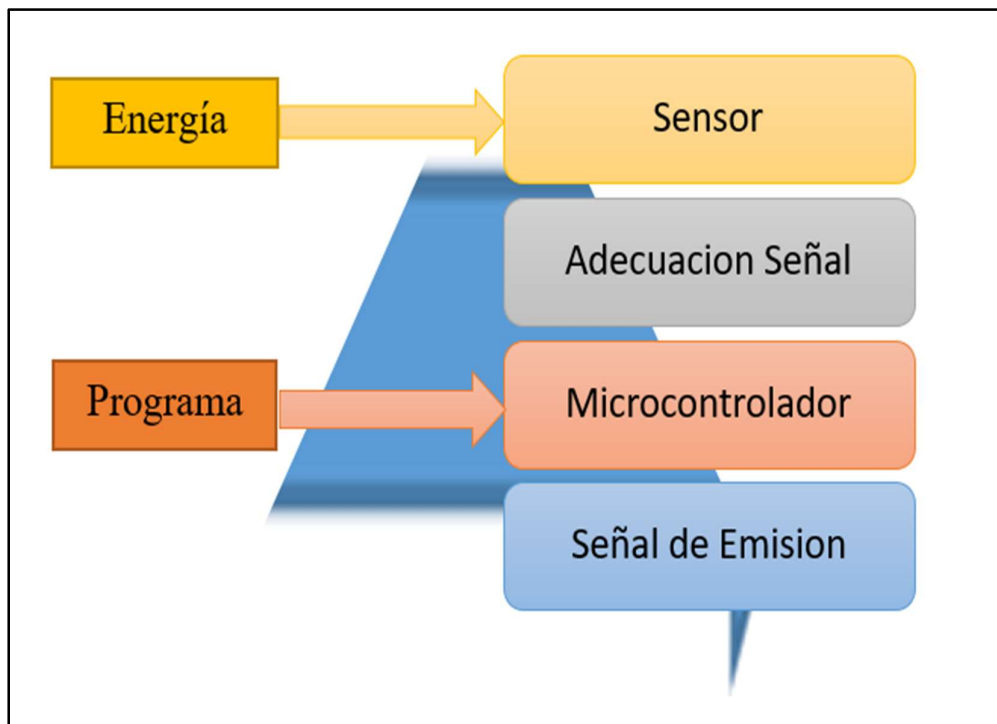


Figura 2.36 Estructura de adquisición de datos de una WSN
Fuente: Autor

2.30.2. Constitución de la red de sensores inalámbricos (WSN)

Básicamente la red wsn está constituida de 4 elementos que funcionan bajo el protocolo Zigbee estos elementos los describiremos a continuación:

- **Sensores:** Son los encargados de recolectar la información del análisis y procedes a transformarlas en señales eléctricas.
- **Nodos de sensor:** Se encarga de entregar la información a la estación base.
- **Gateway:** Es conocida como la puerta de enlace, sirve para transmitir todos los datos obtenidos en el proceso.
- **Estación base:** aquí se procede a recolectar los datos del análisis elaborado.

2.30.3. Topología de una red de sensores inalámbricos.

Las redes de sensores inalámbricos se pueden construir de diferentes maneras todo esto tratando de mejorar una buena ubicación de los nodos para tener un buen envío y una buena recepción de datos. Estas agrupaciones se denominan topologías de la red.

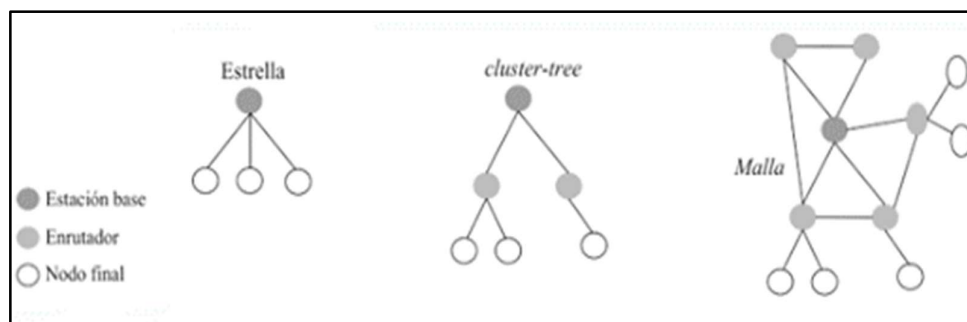


Figura 2.37 Topología de una red de sensores inalámbrica
Fuente: Lidice Romero, Manuel Piña, Margarita Goire (2018)

- **Topología en Estrella.-** Esta estructura está formada por una base y enlazada a varios nodos que contienen sensores para la adquisición de datos, se la conoce como Control de un solo camino porque solo existe enlace entre la estación base y los nodos de sensores.
- **Topología en Árbol.-** Su principal ventaja es brindar una redundancia a problemas de conexión, posee una gran versatilidad y un ahorro de energía, tienen una sola ruta de enrutamiento.

Los nodos finales se conectan rápidamente a los cabezas de clúster que forman conjuntos, estas comunicaciones las maneja el clúster inicial.

- **Topología en Malla.-** Usa los multisaltos para la comunicación entre diferentes nodos y la información puedan enviarse del punto de transmisión al punto de recepción. Tiene herramientas cuando hay problema de desconexión, se reconfigura automáticamente este sistema tiene mucha redundancia.

Su principal desventaja es el excesivo consumo de energía, esto se debe a que sus nodos tienen que enrutarse previamente para enviar información entre ellos. Es una opción aplicable a las redes sin hilos (Wireless), a las redes cableadas (Wired) y a la interacción del software de los nodos.

Una red con topología en malla ofrece una redundancia y fiabilidad superiores. Aunque la facilidad de solución de problemas y el aumento de la confiabilidad son ventajas muy interesantes, estas redes resultan caras de instalar, ya que utilizan mucho cableado. Por ello cobran mayor importancia en el uso de redes inalámbricas

3. MARCO METODOLOGICO

En el presente capítulo se procede a mencionar todos los detalles metodológicos de la investigación, y la propuesta de solución que se implementara para resolver todos los problemas planteados en este proyecto.

3.1. Metodología de la investigación

En el desarrollo de este proyecto se deberá hacer uso de varias metodologías, todas de acuerdo con el problema que fue planteado previamente en capítulos anteriores, todas estas técnicas de desarrollo se explican a continuación.

3.1.1. Investigación bibliográfica documental

Para elaborar una propuesta de solución para el proyecto se toma en cuenta una serie de pasos organizados que debe permitir recolectar, analizar, y estudiar varias fuentes de información como libros, revistas científicas, y trabajos de titulación relacionados al tema en desarrollo.

Uno de los puntos más importantes de esta investigación es el poder recopilar toda la información de trabajos científicos concluidos, y con fuentes confiables previamente confirmadas.

3.1.2. Método experimental

Este método de investigación permitirá controlar todas las variables que se presenten en el desarrollo investigativo con el fin de tener relación entre ellas, se debe analizar y procesar todos los valores experimentales que arrojo el proyecto y darle una correcta manipulación a las variables dependientes como independientes.

3.1.3. Método científico

El método científico permite desarrollar la investigación técnica, basándose en un proceso ordenado de pasos. Esto permite tener una relación entre los hechos realizados por el investigador y los fenómenos físicos que surgen en la investigación, a la vez permiten aplicar los conocimientos científicos obtenidos.

3.2. Técnicas de investigación

Las técnicas de investigación son las herramientas y los procedimientos disponibles que va a utilizar el investigador para obtener datos e información que van a servir para desarrollar una propuesta de solución, se basan en los métodos estudiados anteriormente.

3.2.1 La entrevista

Es una técnica que se emplea para obtener datos de una persona entendida del tema que se está desarrollando, se establece un dialogo entre el entrevistador que requiere la información del entrevistado.

3.2.2 La observación

Esta técnica de investigación permite al investigador observar atentamente el suceso que ocurre, tomar información de este hecho y registrarlo para su análisis, permite al investigador obtener el mayor número de datos del suceso ocurrido.

La observación es también uno de los primeros y principales pasos a la hora de utilizar el método científico. El método científico es el conjunto de reglas y preceptos metodológicos que orientan la conducta de un investigador para garantizar un correcto desarrollo de la misma.

3.3. Propuesta de solución

La propuesta de solución para el proyecto “Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab”, será la construcción de un prototipo basándose en la norma IEEE 1451.5 que se establece para la conexión de los sensores o actuadores a un microprocesador y a sistemas de control, para la comunicación inalámbrica y transmisión de datos de los nodos se utilizará la norma IEEE 802.15.4 que establece que los dispositivos se relacionan entre sí a través de una red inalámbrica sencilla con un rango de conexión de aproximadamente 10m.

Después de tener claro los estándares definidos a utilizar se procederá a diseñar una red que cuenta de dos nodos coordinadores y dos nodos sensoriales, se puede observar en la figura 3.1.

Los nodos sensoriales detectan y transmiten inalámbricamente valores de vibración de la estructura civil a los nodos principal denominados coordinadores, los mismo que a través de su puerto serial (USB) permite el procesamiento de la información. Los nodos se colocarán en puntos estratégicos de la estructura se procederá a medir ciertos parámetros como son vibración, humedad de la estructura para así poder evaluar en qué estado se encuentra esta construcción.

Para la adquisición de datos se utilizará una tarjeta programable como los es Arduino nano, que junto con un algoritmo desarrollado en el software Python se podrá procesar los datos recogidos por los sensores, usaremos Visual Studio Code para enlazar el algoritmo de Python con una base de datos del software SQLite y de esta forma poder almacenar los datos de los sensores. Una vez obtenido los datos con un algoritmo en Matlab podemos leer los datos guardados en nuestra base y a su vez dar un resultado del estado de la construcción mediante gráficas desarrolladas en el Matlab y establecer un análisis comparativo con estándares preestablecidos.

Para la demostración se procederá a simular un sismo con una maqueta a escala, donde irán instalados los nodos sensoriales y se podrá observar la lectura de datos y el procesamiento de estos.

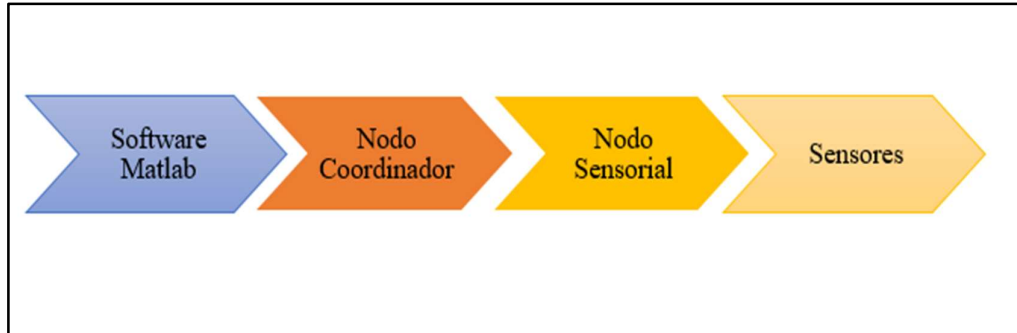


Figura 3.1 Estructura de la propuesta de solución
Fuente: Autor

3.4. Técnicas para la detección de daños en edificios

Con el transcurso del tiempo las edificaciones pueden sufrir daños en su estructura debido al uso, faltas de mantenimiento y a causas de factores naturales de gran magnitud como, sismos, inundaciones, hundimientos de suelo, vibraciones provocadas por el paso de vehículos etc.

El país en los últimos años ha soportado sismos de pequeñas magnitudes que con el pasar de los años van afectando la estructura de las edificaciones, esto puede llevar al colapso de esta y consecuentemente a pérdidas económicas o humanas.

Ecuador soporto desde el año 2016 hasta el año 2018 la cantidad de 17.811 movimientos sísmicos a escala nacional según IGEPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional). Estos datos se representan en la Tabla.3.1, donde se puede observar que el año 2016 es el año más sísmico para el Ecuador en los últimos 18 años, justamente este año se presentó el terremoto que acabo con miles de vidas humanas y dejo perdidas millonarias para el país.

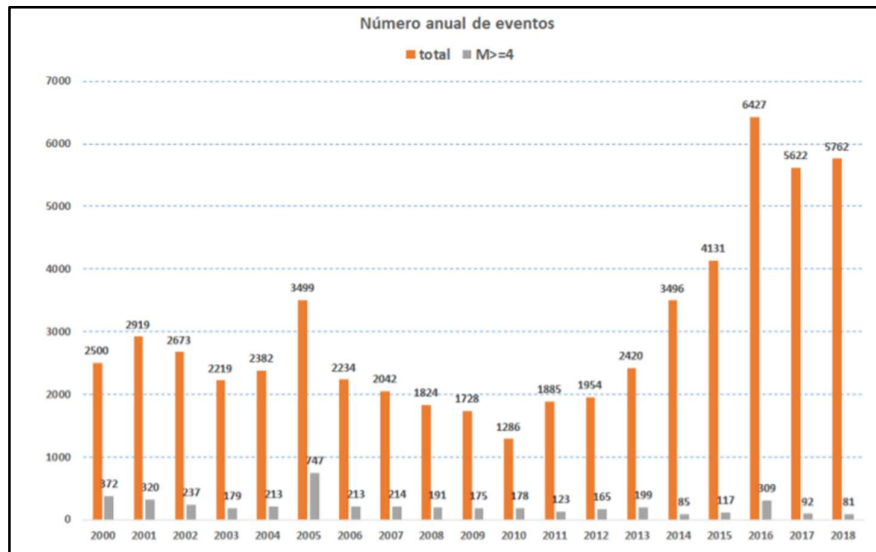


Tabla 3.1 Movimientos sísmicos en Ecuador
Fuente: IGEPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional)

Por esta razón es de vital importancia identificar la magnitud del daño en la estructura, como medida preventiva para tomar decisiones de habitabilidad o reforzamiento de la edificación.

Las técnicas para identificar y medir daño en estructuras son conocidas como monitoreo de salud estructural y tienen como función principal recopilar información del estado estructural del sistema que conforma la estructura sin causar daños en la misma.

Para la detección de daños en estructuras en la actualidad se emplean técnicas muy confiables y de las cuales se llevará a cabo un breve estudio. Dentro de estas técnicas encontramos las siguientes:

- Red de Sensores Inalámbricas
- Rigidez de base
- Minería de datos

3.4.1. Técnica de rigidez de base (Escobar Sánchez, Ramsés Rodríguez)

El uso de esta técnica se basa en que la estructura sufra un cambio en su sistema, este cambio lo provoca el daño sufrido. Este se manifiesta como un cambio en las características dinámicas de la estructura.

Por eso el algoritmo usado en esta técnica tiene como datos de entrada las propiedades dinámicas del sistema, tanto en estado sin daño, como en el dañado. De esta forma se puede tener un análisis rápido y confiable del panorama de la estructura y la magnitud del daño en función de la pérdida de rigidez.

Las estructuras están constituidas por una matriz que se la denomina rigidez de base, esta rigidez es considerada como la fuerza que necesaria para lograr llevar a cabo un desplazamiento. A las estructuras se les ejerce una fuerza para un desplazamiento, la relación entre la fuerza y el desplazamiento se lo conoce como rigidez.

El desconocimiento de las propiedades dinámicas de las estructuras en estado sano. Sin tener acceso a esta información se carece de un patrón de comparación, por esta razón no se puede lograr determinar el valor de la pérdida de rigidez.

El método de rigideces de base (Escobar Sánchez, Ramsés Rodríguez) da solución a este problema. Mediante esta técnica se estima el daño en la estructura solo teniendo como dato la respuesta del sistema dañado y la rigidez lateral aproximada del primer entrepiso en estado sano se puede utilizar este método, años más tarde se aplicaría este método con nuevas investigaciones que potenciaron este técnica de rigidez base, siendo una la descomposición en el dominio de la frecuencia.

Debido a que la totalidad de los datos de entrada dependen de las propiedades dinámicas del sistema. Actualmente existen numerosos métodos para la extracción de parámetros modales, siendo el Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (DDF) (Brincker et. al, 2000) uno de los usados.

La estructura para este análisis conlleva primero al método DDF para la extracción de parámetros modales. Luego se describe el método de rigideces base para detectar daño sin información modal base. Los dos algoritmos son aplicados, tanto para la extracción de propiedades dinámicas como para la detección de daño.

3.4.2. Descomposición en el dominio de la frecuencia

De acuerdo con (Brincker et al. (2000)), la matriz espectral de potencia de la respuesta $q \times q$ debe ser obtenida, en donde q es el número de respuestas. Fórmula para determinar la matriz:

$$[G_{yy}(f)] = [Y^*(f)]^T [Y(f)] \quad (1)$$

Esta matriz opera a frecuencias discretas $f = fp$ donde p es una sucesión discreta para cada frecuencia del dominio. $[Y(f)]$ es la transformada del dominio del tiempo al de la frecuencia para cada valor de frecuencia f . La Ecuación (2) expresa a la Ecuación (1) como una descomposición por valores singulares, DVS:

$$[G_{yy}(f)] = [Up] [Sp] [Up]^T \quad (2)$$

Donde $[Up]$ es una matriz que contiene vectores singulares $\{Upk\}$. $[Sp]$ es una matriz diagonal que contiene a los valores singulares Spk . Estos vectores singulares se grafican en el dominio de la frecuencia y los valores picos pueden ser observados, los cuales corresponden a las frecuencias naturales del sistema. Una forma modal asociada a cada frecuencia puede ser obtenida por medio de la DVS.

3.4.3. Rigidez de base

De acuerdo con (Rodríguez et. al. (2010)) el Método de Rigideces Base (MRB) se puede utilizar para detectar daño en edificios en los que se desconocen los parámetros modales base (estado sin daño). Para un marco plano dañado de s número de pisos e i modos de vibración a través de un procesamiento de señales se pueden conocer sus frecuencias naturales de vibración ω y sus correspondientes formas modales $[\phi]$. Las matrices de rigidez lateral, $[K]$ y de masas $[M]$ son desconocidas y de orden $s \times s$. Por otro lado, es posible calcular un vector $\{u\}$ de cocientes k_i/m_i (Barroso y Rodríguez, 2004) de orden $2s - 1 \times 1$ y de la forma

$$\{u\} = \left\{ \left(\frac{k_1}{m_1} \right) \left(\frac{k_2}{m_1} \right) \left(\frac{k_2}{m_2} \right) \dots \left(\frac{k_i}{m_i} \right) \left(\frac{k_{i+1}}{m_i} \right) \dots \left(\frac{k_s}{m_s} \right) \right\}^T$$

El vector $\{u\}$ se puede calcular a partir de la información modal de la estructura con daño y la rigidez lateral aproximada del primer entrepiso k_1 , suponiendo que tiene un comportamiento de viga cortante. Se sabe que esta suposición es válida para un número limitado de casos reales. Sin embargo, para abarcar la mayoría de los casos reales k_1 puede ser calculada de la siguiente manera:

$$k_1 = \sum \frac{12EI_1}{h_1^3}$$

Una vez hecho el ajuste con k_1 para estructuras que no tengan un comportamiento de viga de cortante, el MRB provee la matriz de rigidez del estado sin daño $[K]$. Simultáneamente, un modelo matemático de la estructura es creado considerando conectividad y geometría de los elementos estructurales, y un módulo de elasticidad unitario. Como resultado, matrices de rigidez aproximadas $[k]$ son obtenidas para cada elemento. Y la matriz de rigidez global de la estructura resulta de:

$$[Ka] = \sum [ka_i]$$

De acuerdo con Escobar et al. (2005), $[Ka]$ puede ser condensada para obtener $[\bar{K}a]$ usando una matriz de transformación $[T]$ de orden $gl \times s$:

$$[\bar{K}a] = [T]^T [Ka] [T]$$

Para una estructura de cortante, la matriz de rigidez lateral $[\bar{K}]$ sólo difieren por las propiedades del material, específicamente por el módulo de elasticidad, que se puede representar por una matriz $[P]$ como $[\bar{K}] = [P] [\bar{K}a]$. Despejando $[P]$ de la ecuación anterior se tiene:

$$[P] = [\bar{K}] [\bar{K}a]^{-1}$$

Por otro lado, las matrices de rigidez para cada elemento estructural en el estado no dañado son calculadas con la siguiente expresión $[Kd] = [Kai]$; donde P es un escalar que ajusta las propiedades de la estructura. Una vez que el estado base de la estructura, representado por $[Kd]$ es identificado y condensando, es comparado con la matriz de rigidez de la estructura dañada $[\bar{K}d]$ usando el Método de Submatrices de Daño (MSD, Rodríguez y Escobar, 2005). Este método es aplicado para localizar y determinar la magnitud del daño, en términos del porcentaje de pérdida de rigidez, en cada elemento estructural.

De acuerdo con (Baruch y Bar Itzhack (1978)), $[\bar{K}d]$ puede ser calculada a partir de información modal medida. De aquí que la matriz de rigidez del sistema dañado reconstruida:

$$[\bar{K}d] = [[\bar{K}] - [M][Z]][H] + [M][q][\Omega]^2[q]^T[M]$$

donde $[H] = [I] - [Y]$ $[Y] = [q][q]^T[M]$ $[Z] = [q][q]^T[\bar{K}]$

$$[q] = [\phi][[\phi]^T[M][\phi]]^{-\frac{1}{2}};$$

$[\phi]$ es la matriz modal de la estructura y $[\phi]^T$ es una matriz diagonal que contiene los valores del sistema.

3.5. Técnica de minería o recolección de datos

Esta técnica es una promisorio tecnología, la cual puede ser definida como el proceso de descubrimiento de nuevas relaciones, patrones o tendencias significativas, a través de un minado de grandes volúmenes de datos almacenados propiamente en una base de datos.

Para llegar a obtener un conocimiento en cuanto a la presencia y localización de daños en el edificio, es necesario seguir un proceso que consiste en transforman los datos obtenidos en información.

La minería de datos se divide en dos categorías que se describen como análisis descriptivo y análisis predictivo, los cuales se hacen un breve estudio a continuación:

- **Análisis descriptivos**

En este tipo de análisis se trata de encontrar patrones (correlaciones, grupos, trayectorias y anomalías) entre las relaciones de los datos, de tal modo que sean capaces de brindar un panorama del comportamiento de los datos estudiados.

- **Análisis predictivos**

El objetivo de este análisis es el de predecir el comportamiento de nuevos datos, a partir de otros atributos de prueba también llamados variables independientes.

Dentro de la biografía técnica, se encuentran distintos métodos que han sido aplicados en la detección del daño en estructuras. Algunos de ellos están basados en el estudio de las frecuencias y resonancias, formas modales, curvaturas modales y otras más, basadas en vibraciones.

3.5.1. Detección de daños con análisis de Clusters

En 2010, Lazarevic, tratan de localizar el daño en una estructura con múltiples variables objetivo, y para predecir el valor de dichas variables se basan en la obtención de datos de las frecuencias naturales (medidos de la estructura, d_1, d_2, \dots, d_n), los cuales están compuestos por el par c, O , donde c son los atributos de la frecuencia medida, $c = c_1, c_2, \dots, c_m$ y $O = o_1, o_2, \dots, o_p$, son las variables objetivo.

Para la determinación de daño, proponen un particionamiento jerárquico de Clusters como se observa en la figura 3.2, el cual consiste de tres partes básicas que se aplican recursivamente: (1) particionar el grupo de datos, (2) localizar los grupos de interés en las variables objetivo y (3) predecir las variables objetivo. También incluyen el uso de K-NN basado en densidades, y tomando los valores de las frecuencias más bajas, logran determinar en qué lugares se puede presentar daño.

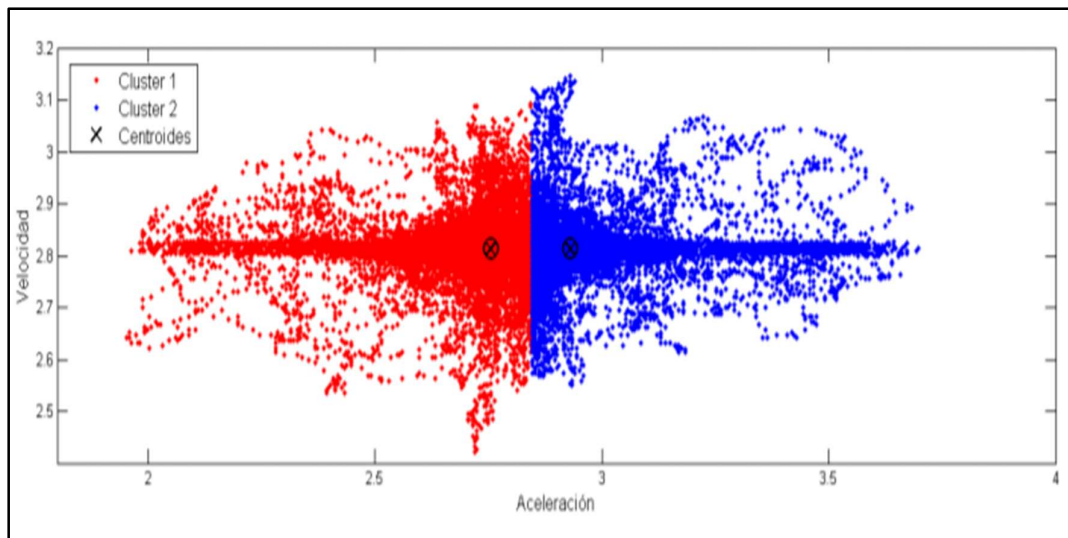


Figura 3.2 Detección de daño por análisis de clúster

Fuente: Autor

3.5.2. Detección de daños con bosques aleatorios

Los bosques aleatorios han sido utilizados para clasificar el daño en estructuras. Este método detecta y clasifica el daño para estructuras un tanto complejas, esto lo hacen con ayuda de un modelo de análisis de elementos finitos.

Esta técnica se basa mucho en la teoría de Young), esta técnica se refiere a como los cuerpos toman una dirección de movimiento según el sentido de la fuerza aplicada, hace mención a elementos elásticos.

Los autores, obtienen los valores del módulo de elasticidad de cada elemento (columnas principales) en la estructura, que posteriormente utilizan para entrenar un Bosque Aleatorio y predecir el daño.

De acuerdo con los autores, este método es capaz de detectar el daño en estructuras de escalas mayores y complejas, a través de la simplificación de la estructura en subestructuras más pequeñas y de esa manera analizar los elementos de una manera individual, permitiendo detectar el daño por sectores y aumentando la escalabilidad y la identificación de múltiples elementos de falla con mayor exactitud.

3.5.3. Detección de daños basados en el cambio de frecuencias

La presencia de daño o deterioro en una estructura conlleva a la modificación de las frecuencias naturales de la misma, por tanto existen métodos para determinar esos cambios que afectan a dicha estructura y con ello inferir la presencia del daño. Dado los múltiples cambios de frecuencia que pueden ser obtenidos de las estructuras, estos pueden proveer de información espacial acerca del daño estructural ya que los cambios en la estructura en diferentes localizaciones causarán diferentes combinaciones en las frecuencias modales.

En varios estudios se muestran los resultados en el que intentan identificar el daño en un catálogo de posibles escenarios. Los autores calculan la frecuencia de los cambios de distintos escenarios con daño y sin daño.

Después las proporciones de todos los cambios de frecuencia son calculados mediante el uso de un análisis de correlación modal (MAC), obteniendo las matrices de las frecuencias.

Por último, comparan las matrices y de acuerdo con un rango de valores que varían según el daño (los valores están en el intervalo de $[0, 1]$ según su correlación), son capaces de detectar la presencia de daño.

En otro trabajo, Gudmunson utiliza un enfoque de detección de daño basado en las perturbaciones de la energía, derivada de las frecuencias resonantes provocadas por el daño presente en la estructura.

3.5.4. Detección de daños basados en sus características dinámicas

En la actualidad, existen numerosos análisis que permiten estimar respuestas dinámicas de estructuras modeladas tanto analíticamente como experimentalmente. Todos estos análisis tienen en común que tratan de identificar el daño sin afectar la integridad de la estructura.

Desde el año de 1984, West muestra que es posible utilizar la información de las formas modales para la localización de los daños estructurales, sin la necesidad de utilizar antes un método de elementos finitos. El autor utiliza el criterio de correlación modal para determinar el nivel de correlación entre modos de prueba de una estructura, antes y después de ser sometida a daño.

Las formas modales son particionadas junto con los cambios en los valores de correlación modal, para conocer los daños que se presentan en dicha estructura. En 1997, Ratcliffe presenta una técnica para localizar el daño en una viga, utilizando una aproximación de diferencia finita de un operador Laplaciano en las formas modales de los datos.

El mismo año Cobb y Liebst, presentan un método para priorizar la localización de sensores para la identificación de daño, basado en un análisis de sensibilidad de los datos de cada sensor.

Después Stubbs, implementan un método que calcula el cambio en la energía de deformación almacenada en una estructura, basado en el hecho de que cuando se presenta un daño, la distribución de energía se verá afectada, disminuyendo así la deformación almacenada.

3.6. Vida útil de los edificios

Al momento de diseñar los edificios, los arquitectos e ingenieros deben conocer y partir de una vida útil de diseño, es decir un tiempo de referencia durante el cual se espera que la construcción permanezca sin necesidad de realizar un mantenimiento correctivo muy costoso que se aleje del presupuesto original (International Standards Organization, 2000; Hernández, 2012).

Es muy importante tomar en cuenta esta vida útil, ya que va a determinar en muchas ocasiones el tipo de materiales y sistemas de construcción y así mejorar la durabilidad del edificio. Entendemos durabilidad como la capacidad que tiene el edificio para soportar el deterioro y alcanzar la vida útil estimada (Canadian Standards Association, 2001).

Por otro lado, los constructores de edificios tampoco suelen contemplar el uso del método de ISO 15686 cuya norma se forma a su vez de un conjunto de 11 apartados más, que sirve para determinar y estimar la vida útil y durabilidad de un edificio (Hernández, 2010).

3.6.1. Estimación de la vida útil en edificios

Existen dos formas distintas para medir la vida útil de los edificios y de sus partes.

- La primera y la más recomendable para empezar a diseñar un inmueble es la que indica el método por factores de ISO 15686, que implica estimar una vida útil a partir de una serie de factores de durabilidad y de una vida útil de referencia, que en materia arquitectónica se llama vida de diseño.
- La segunda forma es calcular la vida útil y medir la durabilidad por componente constructivo o partes del edificio a través de pruebas de envejecimiento acelerado en laboratorio, lo cual es demasiado costoso económicamente y muy tardado para fines de diseño arquitectónico, por lo que esta opción generalmente es descartada en etapas tempranas de los proyectos (Hernández, 2015).

Los siguientes son los factores de durabilidad que el método de ISO 15686 utiliza, y que arquitectos e ingenieros deben tomar en cuenta cuando inician la planeación y el diseño de un edificio o de una infraestructura urbana:

- A.** Calidad del diseño arquitectónico y constructivo
- B.** Calidad de los materiales de construcción
- C.** Tipo de medio ambiente interior del edificio
- D.** Tipo de medio ambiente exterior del lugar
- E.** Calidad de la mano de obra.
- F.** Uso que se le dará al edificio
- G.** Tipo y grado de mantenimiento

La siguiente tabla 3.2 nos representa la estimación de vida útil de diseño por categoría o tipos de edificios con las diferentes características que posee cada construcción.

Categoría de edificios	Vida útil de diseño por categoría(años)	Características
Temporales	Hasta 10 años	Construcciones no permanentes, oficinas de ventas, edificios de exhibición temporal, construcciones provisionales.
Vida media	25 – 49 años	La mayoría de los edificios industriales y la mayoría de las estructuras para estacionamientos
Vida Larga	50 – 99 años	Edificios residenciales, comerciales, de oficinas, de salud y de educación.
Permanentes	Más de 100 años	Edificios monumentales, que sean patrimonios de un estado (museos, galerías e iglesias.)

Tabla 3. 2 Estimación de vida útil de diseño (VUD).

Fuente: Silverio Hernández Moreno Doctor en Arquitectura por la Universidad Nacional Autónoma de México

3.6.2. Método por factores la norma ISO 15686

En primer lugar, se determina qué tipo de edificio es y su ubicación, para que con base en la Tabla 3.2 se determine la vida útil de diseño por categoría de edificio.

Ejemplo: El edificio denominado Bloque B que corresponde a la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, Ecuador, pertenece a la categoría de Educación, y por lo tanto debe tener un largo periodo de duración, de entre 50 y 99 años; al ser un centro de estudio de Tercer nivel, se recomienda considerar el valor más alto dentro del rango establecido, es decir, 99 años.

En segundo lugar, se designan los factores más relevantes para la durabilidad del proyecto y se asigna un valor para cada uno de la siguiente manera: 0.8 = bajo; 1 = medio y 1.2 = alto (véase la Tabla 3.3 donde explica cada factor y el valor asignado al proyecto mencionado del edificio del bloque B de la Universidad Politécnica Salesiana)

Factores		Valores asignados
A. Calidad del diseño arquitectónico y constructivo	1.2	El nivel de diseño es muy bueno, la empresa constructora está certificada por varios organismos internacionales, posee más de 20 años en obras de diseño y proyectos de gran escala de ingeniería.
B. Calidad de los materiales de construcción	0.8	Se eligió el menor valor, debido al uso de materiales que no cuentan con un alto estándar de calidad y certificaciones que avalúen un proceso de fabricación.
C. Tipo de medio ambiente interior del edificio	1.0	Se calcula que las condiciones ambientales, en el interior del edificio no generaran daños a los materiales constructivos por el buen diseño que se realizó.
D. Tipo de medio ambiente exterior del lugar y la contaminación urbana.	0.8	Se le asigna un valor bajo, debido a la ubicación del proyecto, está ubicado cerca de una pequeña zona industrial y de mucho tráfico pesado y marítimo, se encuentra rodeado de un río que tiende a tener corrientes altas, está expuesto a un alto grado de radiación solar por las altas temperaturas de la ciudad de Guayaquil.
E. Calidad de la mano de obra.	1.2	La mano de obra está certificada por normas ISO de construcción, al igual que la calidad de diseño posee más de 20 años desarrollando proyectos similares.
F. Uso que se le dará al edificio	1.0	Es un factor que no incide de una manera muy significativamente al proyecto, el diseño realizado cubre las necesidades de uso.
G. Tipo y grado de mantenimiento	1.0	Se espera que el grado de mantenimiento preventivo será el adecuado, la constructora encargada de la obra entregara un manual de mantenimiento durante la vida útil del edificio.

Tabla 3. 3 Factores para la estimación de la vida útil del edificio de la UPS
Fuente: Silverio Hernández Moreno Doctor en Arquitectura por la UNAM

Como tercer punto procedemos con la determinación y estimación de la vida útil del edificio del bloque B de la Universidad Politécnica Salesiana de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\mathbf{VUE = VUD (A) (B) (C) (D) (E) (F) (G).}$$

Donde VUE es la vida útil estimada, VUD es la vida útil de diseño, y de A hasta G son los factores que inciden en la vida útil del componente constructivo.

Una vez que se analizan los factores se determinan los valores (0.8, 1.0 o 1.2) para cada uno, según las condiciones del proyecto y de acuerdo con el estudio realizado y por los ejemplos vistos en este caso por parte del autor. Se sustituyen los valores en la fórmula:

$$\mathbf{VUE = 99 \times 1.2 \times 0.8 \times 1.0 \times 0.8 \times 1.2 \times 1.0 \times 1.0}$$

$$\mathbf{VUE = 91.23 \text{ años}}$$

3.7. Estrategias para la construcción del prototipo

Una de las estrategias más importantes al momento de la construir el prototipo es elegir el tipo de red inalámbrica en la cual va a operar el prototipo. Para esto se debe hacer un análisis red por red para saber cuál de los cuatro tipos de red inalámbrica se ajustaba al desarrollo del proyecto.

Este análisis que se menciona se lo desarrollo en el capítulo 2 de este proyecto en los diferentes tipos de Redes inalámbricas que existen.

Se procede a elegir la Red Inalámbrica de Área Personal (Wireless Personal-Área Networks - WPAN), porque presenta características que se las menciona posteriormente que se ajustan a la estructura de construcción y operación del prototipo.

Red Inalámbrica de Área Personal (Wireless Personal-Área Networks - WPAN)

- Se procede a seleccionar esta red porque permite una comunicación en un rango de distancia de unos 10 metros.
- La diferencia con otras redes inalámbricas, WPAN necesita poca o ninguna infraestructura para su operación.
- La red se caracteriza por su bajo consumo de energía y una aceptable transmisión de datos.
- La característica más importante hace mención que dentro del rango de operación de la red WPAN opera el protocolo ZigBee como se observa en la figura 3.3, que se usará para la construcción del prototipo que regirá junto a otras normas establecidas del estándar IEEE.

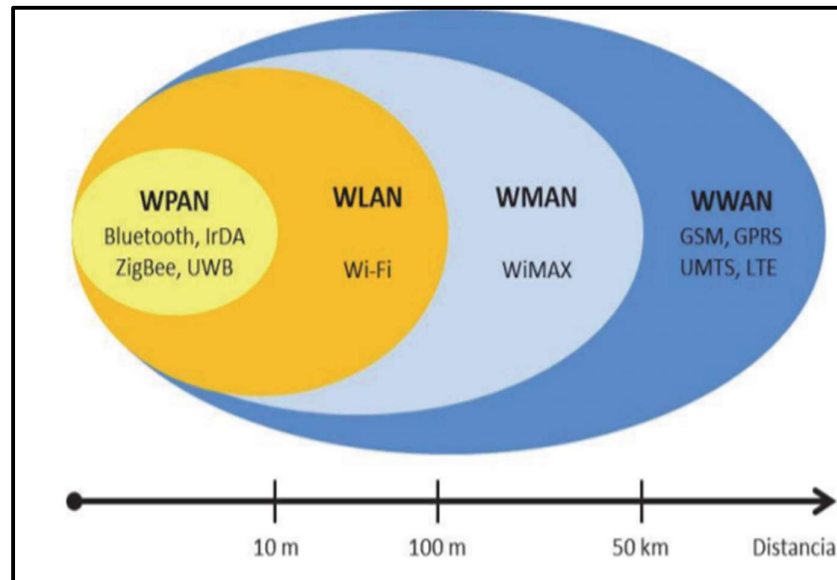


Figura 3.3 Operación de las redes inalámbricas
Fuente: Jordi Salazar, Redes Inalámbricas.

3.7.1. Método de conexión inalámbrica del prototipo

Para la conexión de la red de sensores inalámbrica se procedió a analizar la tipología de conexión, esta tipología cuenta de tres maneras de conexión establecidas las cuales son estrella, árbol y malla.

Después de un análisis conceptual y estructural realizado en el capítulo 2 de este trabajo se decidió establecer el método de conexión a usar será tipo Estrella por estrategias y facilidades de conexión, como se puede observar en la figura 3.4 que detalla la topología en estrella.

Topología en estrella

- Esta estructura consta de un (nodo coordinador) y algunos nodos sensoriales.
- Existen bajas posibilidades de colapso del sistema porque los nodos poseen caminos únicos de conexión.
- Los nodos coordinadores dependen de una cantidad de nodos sensoriales, el tráfico de datos es su única falla para la red, puede tardar varios segundos.

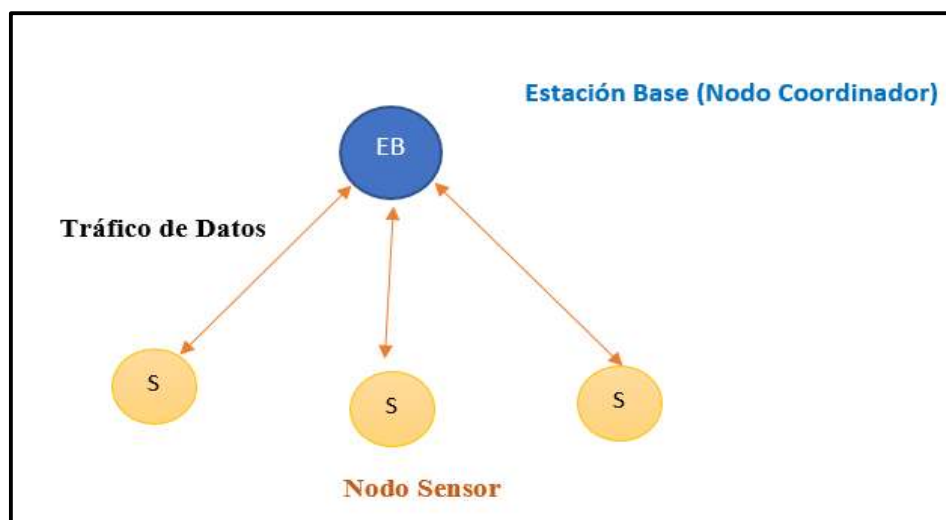


Figura 3.4 Método de conexión inalámbrica en estrella

Fuente: Autor

3.8. Diseño de la red del prototipo

En el diseño del prototipo y su red es muy importante el análisis realizado anteriormente sobre estrategias de construcción y los métodos de conexión que se va a utilizar para el diseño.

La red del prototipo en toda su estructura cuenta con dos nodos sensoriales, este nodo cuenta con el sensor Sw-20 que es el encargado de leer todo tipo de vibraciones de la estructura. Estos dos nodos enlazados inalámbricamente siguiendo los estándares de la norma IEEE 802.15.4 que permite la conexión con los dos nodos coordinadores.

A su vez estos nodos coordinadores, están recogiendo información mediante el software Python y siendo guardados en una base de datos SQLite. Los nodos coordinadores están conectados por un puerto serial (USB) a un ordenador que por medio de software Matlab procesa y grafica los resultados obtenidos.

Toda la estructura y funcionamiento del desarrollo técnico del proyecto “Diseño e implementación de un prototipo para un sistema de monitoreo de edificios basado en una red de sensores inalámbricos mediante software libre y Matlab”, lo podemos ver en el diagrama de bloques de materiales de la Figura 3.5.

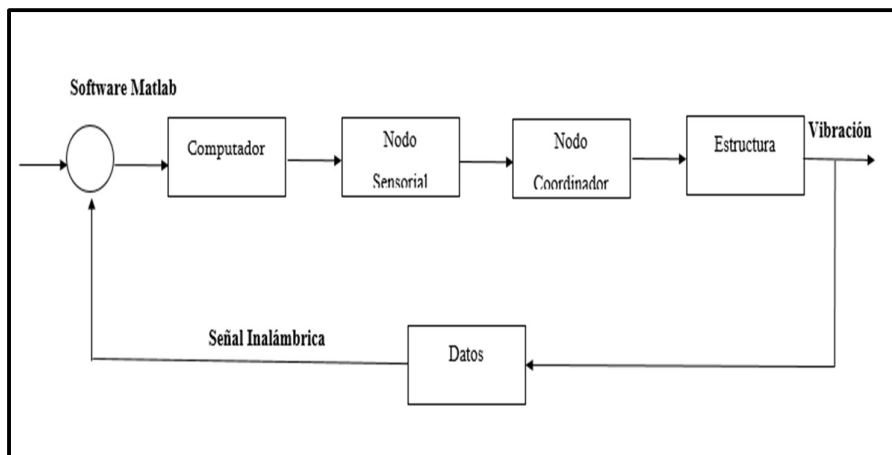


Figura 3.5 Diagrama de bloques del prototipo de monitoreo

Fuente: Autor

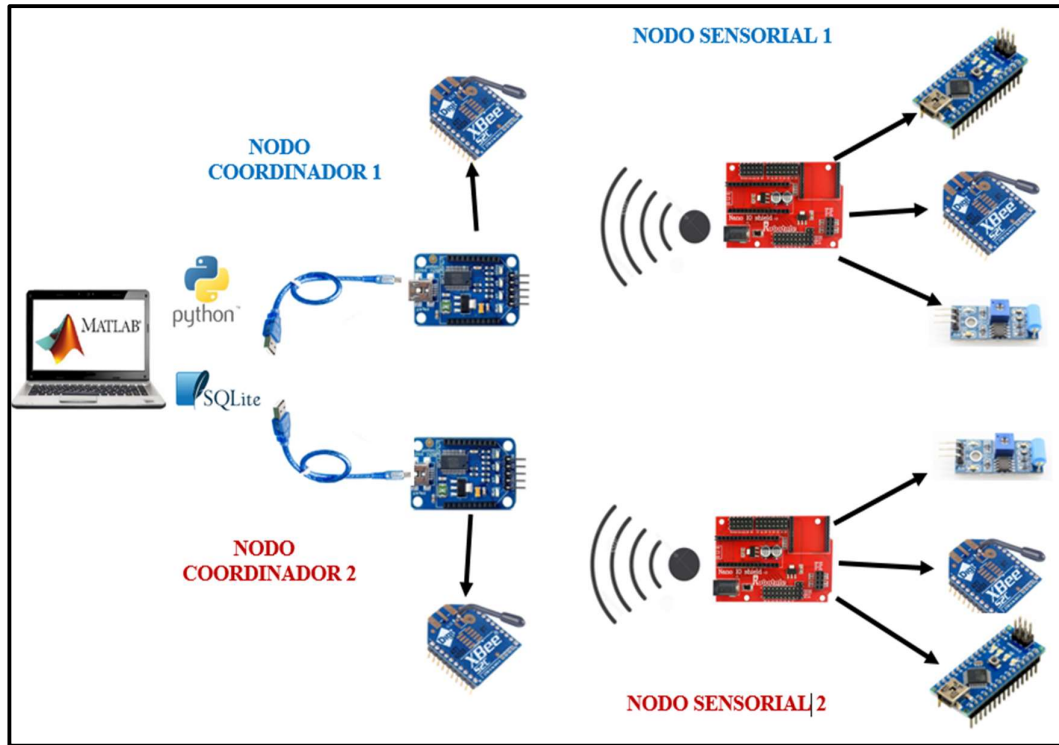


Figura 3.6 Diseño de la red y estructura virtual del prototipo de monitoreo
Fuente: Autor

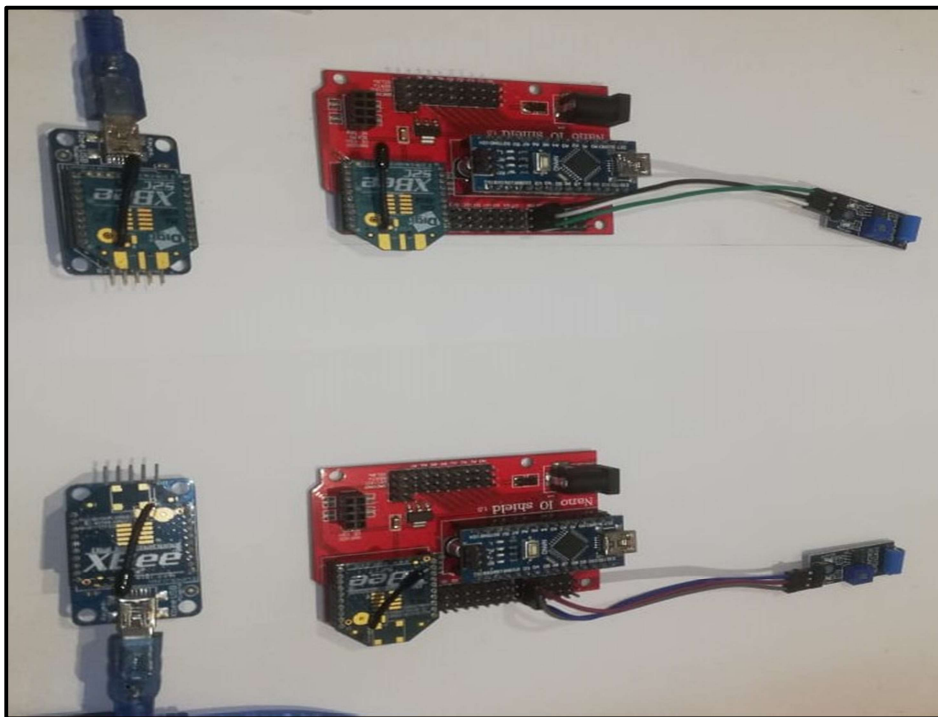


Figura 3.7 Estructura física de la red del prototipo de monitoreo
Fuente: Autor.

3.9. Nodos sensoriales

Los nodos sensoriales del prototipo de monitoreo serán los encargados de recopilar toda la información de señales de vibración que se producen en la estructura. Este nodo en su estructura cuenta con la placa Nano IO Shield. En esta placa se proceden a realizar las respectivas conexiones bajo la Norma IEEE 1451.5, que se detalla como un estándar para conexiones de sensores inteligentes con un microprocesador o sistemas de control.

En la placa Nano IO Shield se encuentra el sensor SW-420 que es el encargado de registrar todo movimiento que se produce en la estructura y convertirlas en señales, estas señales se las conocerá como frecuencias.

Para guardar y procesar estas señales de frecuencia se utilizará mediante el Arduino Nano que es el microcontrolador utilizado en este proyecto, véase la figura 3.8 a continuación.

Como último elemento del nodo sensorial está el módulo Xbee S2C que será el encargado de transmitir los datos del nodo sensorial al nodo coordinador, basándose en el estándar de IEEE 802.15.4 que se estable para la comunicación y transmisión de datos en una red inalámbrica con un alcance de hasta 10 metros, que es donde trabaja el protocolo ZigBee.

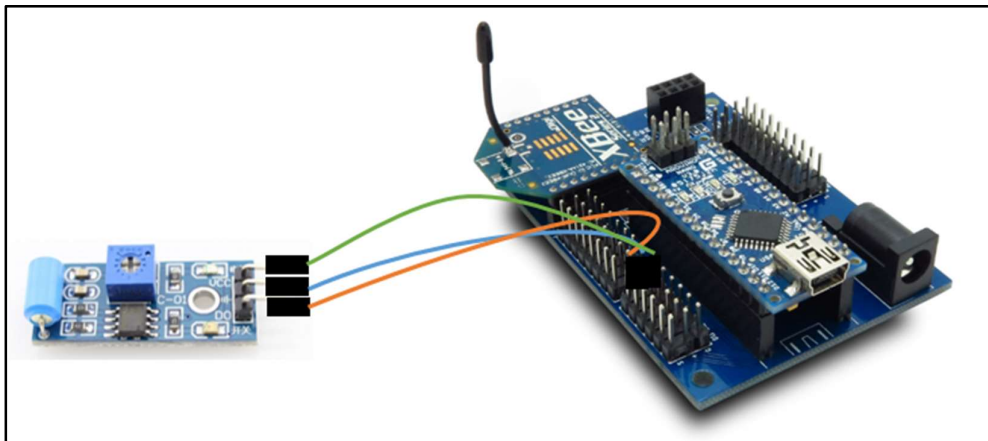


Figura 3.8 Estructura virtual de conexión del nodo sensorial

Fuente: Autor.

En la Figura 3.9 se observan los elementos que serán utilizados en el desarrollo de los Nodos Sensoriales, la placa Nano IO Shield, el Arduino Nano para controlar y almacenar la información, el módulo de vibración SW-420 encargado de detectar vibraciones y el módulo Xbee S2C encargado de la transmisión de Datos.

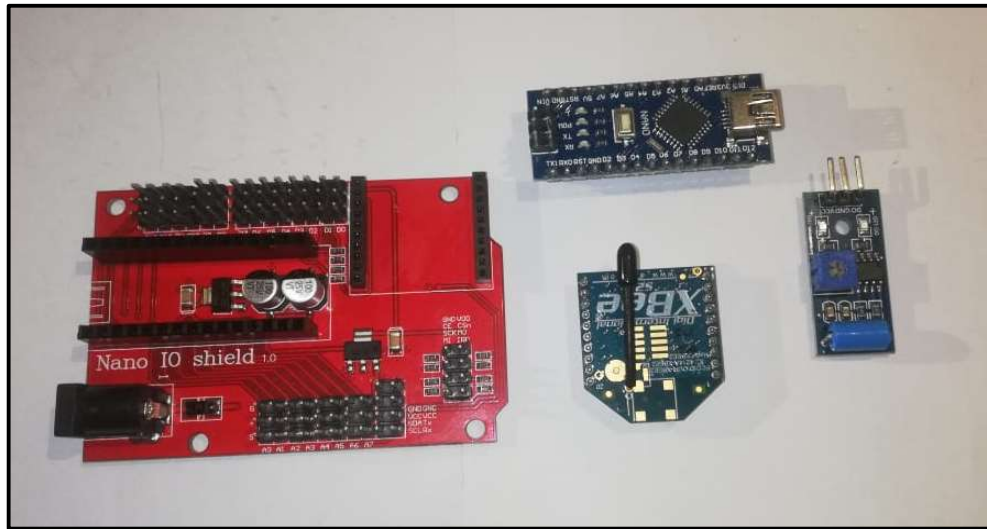


Figura 3.9 Elementos del nodo sensorial
Fuente: Autor.

3.10. Nodo coordinador

Los nodos coordinadores del prototipo de monitoreo tendran la funcion de recibir todos los datos transmitidos de los nodos sensoriales. Los nodos coordinadores estan conectado en forma de estrella a cada nodo sensorial para facilitar el envio y recepcion datos por medio del módulo Xbee S2C.

El nodo coordinador cuenta con un módulo de xbee Usb que sera el encargado de almacenar los datos recibidos del nodo sensorial en su chip. Este módulo permite una transmision estable de datos y va conectado a la computadora por medio de un puerto serial Usb donde se procede a procesar la informacion con los diferentes software a usar en este proyecto.

Este módulo cuenta a su vez de un socket donde va instalado el módulo Xbee S2C para poder recibir la información del nodo sensorial, como se observa en la figura 3.10 que muestra la estructura del nodo coordinador.

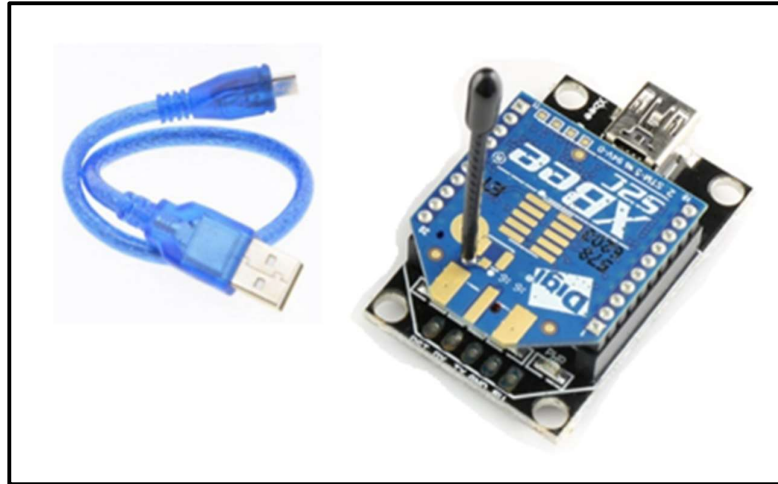


Figura 3.10 Estructura virtual del nodo coordinador
Fuente: Autor.

Se pueden apreciar en la figura 3.11 los elementos como el módulo Xbee USB y el módulo Xbee S2C que serán utilizados en la recepción y almacenamiento de datos, estos módulos forman parte desarrollo de los Nodo Coordinadores del Proyecto de Titulación.



Figura 3.11 Elementos del nodo coordinador
Fuente: Autor.

3.11. Programación en Python

Por medio del lenguaje de programación Python, y gracias a que es considerado un software libre de múltiples usos, es el elegido para el desarrollo del prototipo de monitoreo por su gran compatibilidad con los módulos de Arduino será el encargado de registrar los datos de lectura de los sensores.

Python ayuda en la generación de una base SQLite, que se encargara de guardar las mediciones de los sensores, véase la interfaz del software Python en la figura 3.12.



Figura 3.12 . Interfaz del lenguaje de programación Python
Fuente: Autor.

3.12. Almacenamiento en la base de datos SQLite

SQLite se encargará de almacenar todos los datos recogidos por el sensor Sw-420 que es parte del nodo sensorial de la red de sensores inalámbricas (WSN), esta base datos permite una configuración sencilla e instantánea, ya que no se necesita ningún servidor que configurar.

Para conectar SQLite con Python se establece una importación del módulo sqlite3 que generara un sistema de conexión para el enlace con la base de datos. En Python se procede a ejecutar las funciones de SQLite previamente con un objeto cursor.

A continuación en la figura 3.13 se detalla cómo se importa el módulo `sqlite3` y la creación de un objeto de conexión para las sentencias en Python que se utilizarán en el desarrollo de este proyecto.

```
import sqlite3

con = sqlite3.connect('mydatabase.db')

cursorObj = con.cursor()
```

Figura 3.13 Configuraciones de SQLite con Python
Fuente: Autor.

3.13. Visual Studio Code

Este editor de código fuente que se observa en la figura 3.14, trabaja muy bien con el lenguaje de programación Python y con SQLite, esto permite hacer una relación entre ellos, y poder visualizar las líneas de sintaxis esto permitirá la elaboración de la base de datos donde se guardará la información del prototipo de monitoreo de salud estructural.

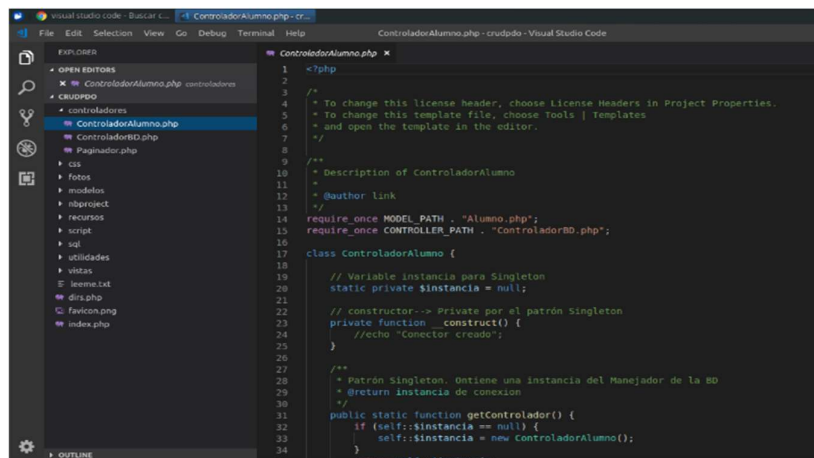


Figura 3.14 Interfaz de Visual Studio Code
Fuente: Autor.

3.14. Matlab en el análisis de datos

Uno de los principales puntos a favor para el desarrollo del prototipo de monitoreo es la elección del software Matlab. Es una herramienta orientada a procesos y sistemas de control en ingeniería.

Matlab se encargará de relacionarse con la base de datos SQLite 3 mediante uso de sintaxis las cuales se encargan de esta comunicación, las sintaxis de comunicación entre Matlab y SQLite se pueden observar en la figura 3.15.

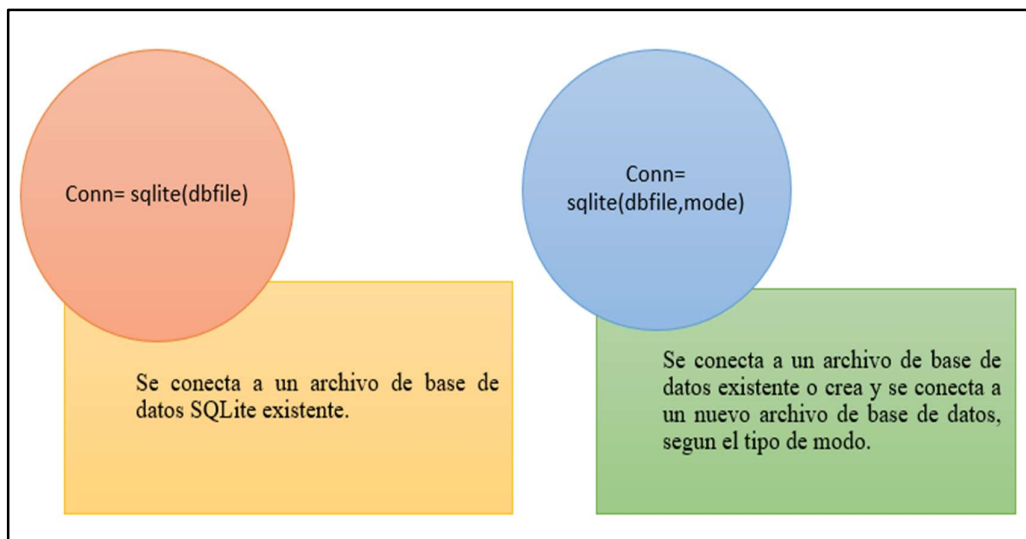


Figura 3.15 Sintaxis de comunicación entre Matlab y SQLite

Fuente: Autor

Después de la comunicación, procesara todos los datos que fueron recogidos por los nodos sensoriales y guardados en la base de datos SQLite.

Procederá a realizar un análisis de estos datos mediante graficas de frecuencia. Luego ejecutará una respectiva comparación con tablas de datos de frecuencia de estándares de medición previamente guardados que será usado para el análisis del proyecto.

3.15. Construcción del prototipo

Se comenzará la construcción del prototipo, ensamblando los diferentes materiales a usar, tanto para los nodos sensoriales como para los nodos coordinadores como lo veremos en las siguientes imágenes.

3.15.1. Ensamblaje de los nodos coordinadores

Se procede al ensamblaje de los nodos coordinadores que formaran parte del proyecto, estos nodos están compuestos por el módulo xbee Usb que será donde se conecte el módulo xbee S2C, esto se puede apreciar en la figura 3.16 y 3.17 que se menciona a continuación.

El nodo coordinador 1 y el nodo coordinador 2 serán los encargados de recibir los datos que son obtenidos por el sensor ubicado en la estructura a ser monitoreada.

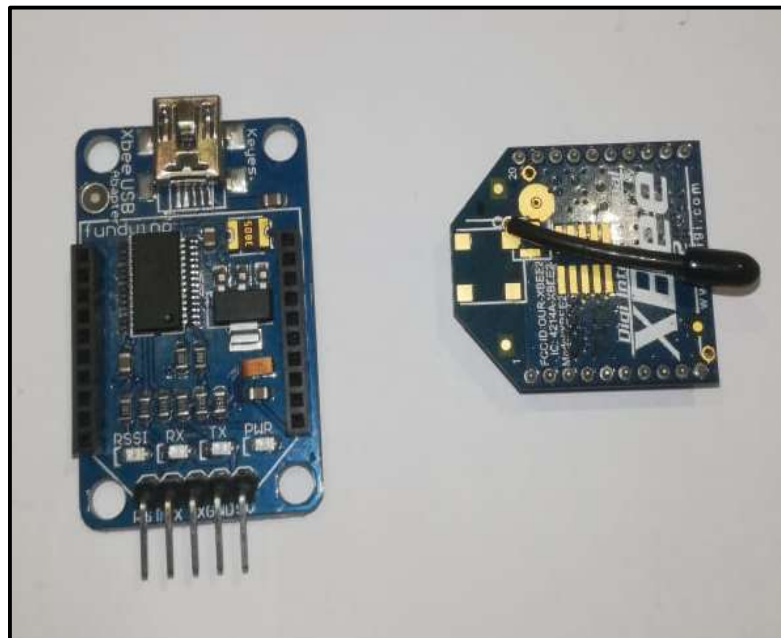


Figura 3.16 Piezas del nodo coordinador 1
Fuente: Autor.

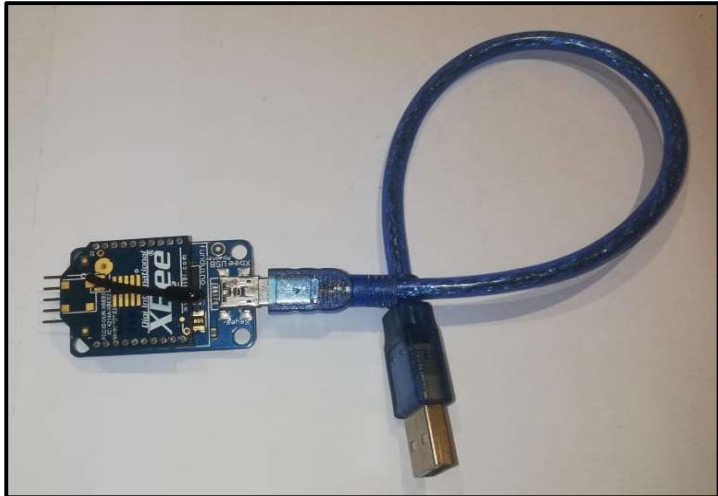


Figura 3. 17 Ensamblaje del nodo coordinador 1
Fuente: Autor.

3.15.2. Ensamblaje de los nodos sensoriales

Se lleva acabo el ensamblaje de los nodos sensoriales que serán utilizados para monitorear la estructura, los nodos sensoriales están compuestos por el módulo Nano IO Shield, arduino nano, xbee S2C y el sensor sw-420 todos estos elementos se pueden apreciar en la figura 3.18 y su respectivo ensamblaje véase la figura 3.19 donde se observa las conexiones de cada elemento.

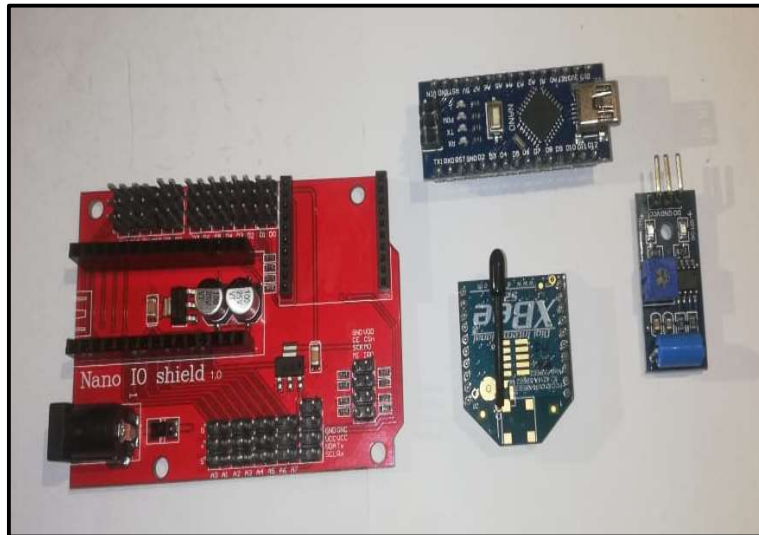


Figura 3. 18 Piezas del nodo sensorial 1
Fuente: Autor.

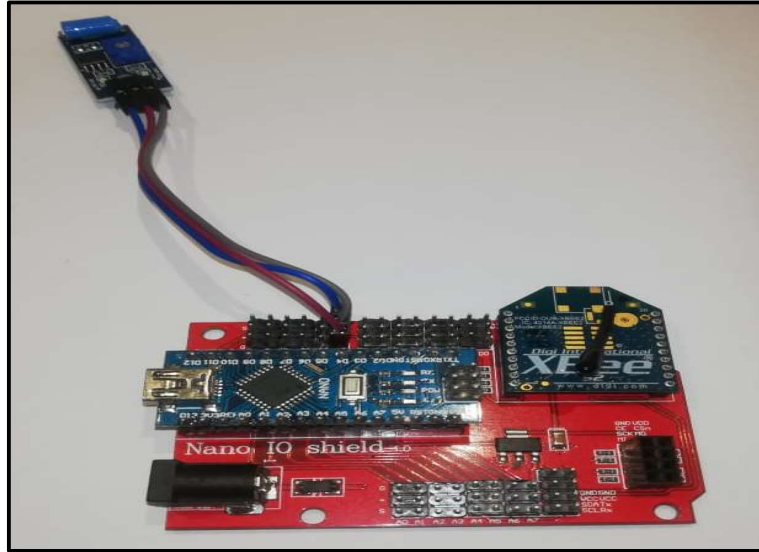


Figura 3. 19 Ensamblaje del nodo sensorial 1
Fuente: Autor.

Se puede observar en la figura 3.20 la conexión de los elementos que conforman los nodos sensoriales del proyecto, estos nodos son energizados con baterías inalámbricas de larga duración, para que el prototipo permanezca conectado monitoreando la estructura.



Figura 3. 20 Funcionamiento del nodo sensorial 1
Fuente: Autor.

3.16. Configuración de los módulos Xbee S2C

Para realizar la configuración de los módulos Xbee S2C se procedió a utilizar el software XCTU para ajustar los parámetros de los Xbee que serán los encargados de transmitir los datos del proyecto véase la figura 3.21 muestra la configuración de los xbee.

Para conectar de forma inalámbrica ambos Xbee S2C es necesario configurar uno como el dispositivo coordinador y el otro como dispositivo final así ambos equipos van a estar enlazados y listos para la transmisión de datos.

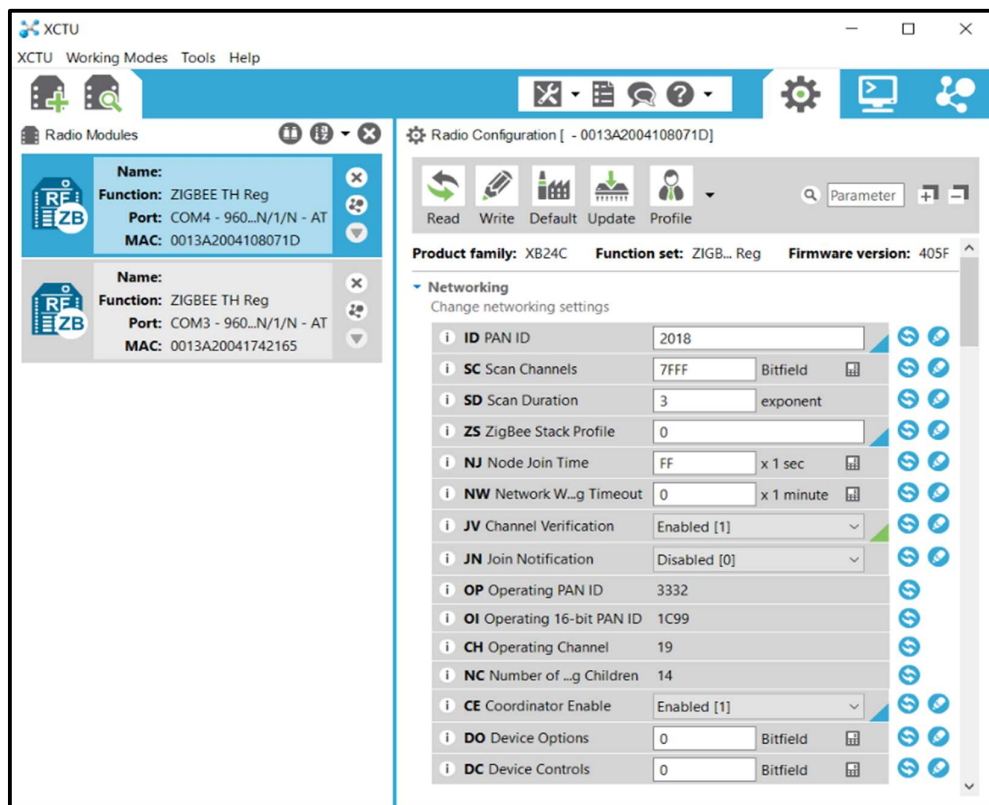


Figura 3. 21 Interfaz de configuración de los módulos Xbee S2C.

Fuente: Autor

Una vez configurados los módulos Xbee S2C procede a verificar la conexión punto a punto con un pequeño envío de mensajes. En la siguiente figura 3.22 podemos ver el envío de mensajes de un Xbee 1 hacia el otro Xbee 2 configurado.

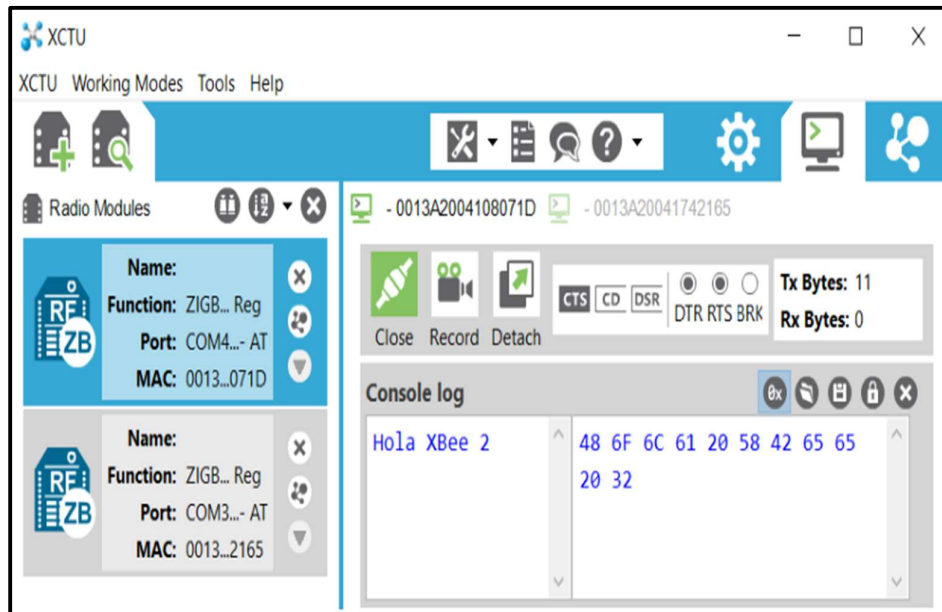


Figura 3. 22 Prueba de envío de mensajes los Xbee
Fuente: Autor.

En la figura 3.23 observamos que el Xbee S2C 2 recibe los mensajes enviados por el Xbee S2C 1 como prueba de una correcta configuración y comunicación de ambos Xbee S2C, los mensajes en color azul corresponden a mensajes enviados y los mensajes en color rojo corresponde a mensajes recibidos, de esta manera se comprueba que existe un dispositivo coordinador y un dispositivo final.

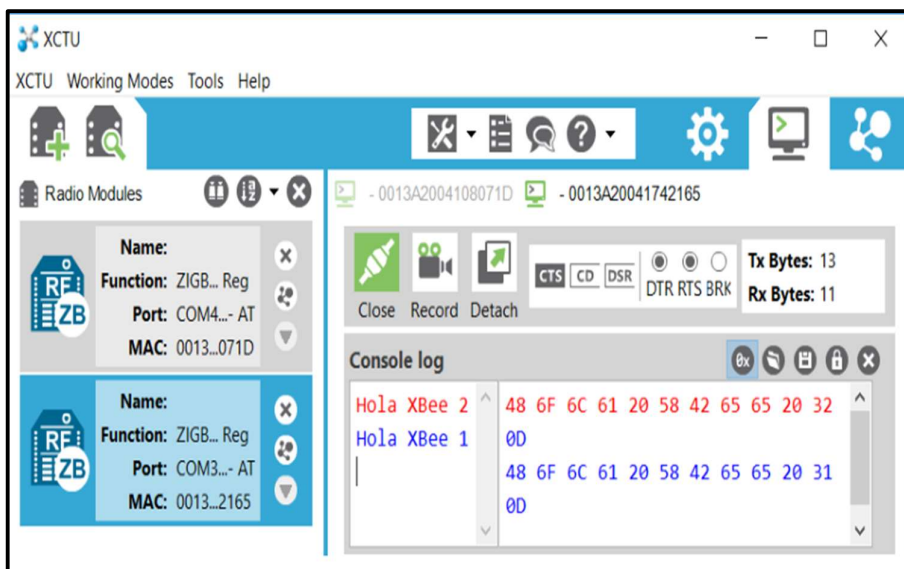


Figura 3. 23 Prueba de recepción de mensaje de los Xbee.
Fuente: Autor.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Cuando se inició la elaboración de este proyecto se manifestó como meta el Diseño e implementación de un prototipo usando una red de sensores inalámbricos para un sistema de monitoreo de edificios mediante software libre y Matlab.

Este proyecto será de gran ayuda porque permitirá conocer los daños que sufre una estructura después de haber sido sometida a sucesos naturales como sismos, vibraciones de vehículos o algún otro suceso que cause daño en las estructuras.

4.1. Funcionamiento y ejecución del software del proyecto

Para la ejecución del prototipo y la lectura de datos que recogen los sensores se usa el lenguaje de programación Python, se envía a ejecutar todo lo realizado en este lenguaje con visual Code, esto facilita la lectura de las líneas de comando, véase la figura 4.1 a continuación.

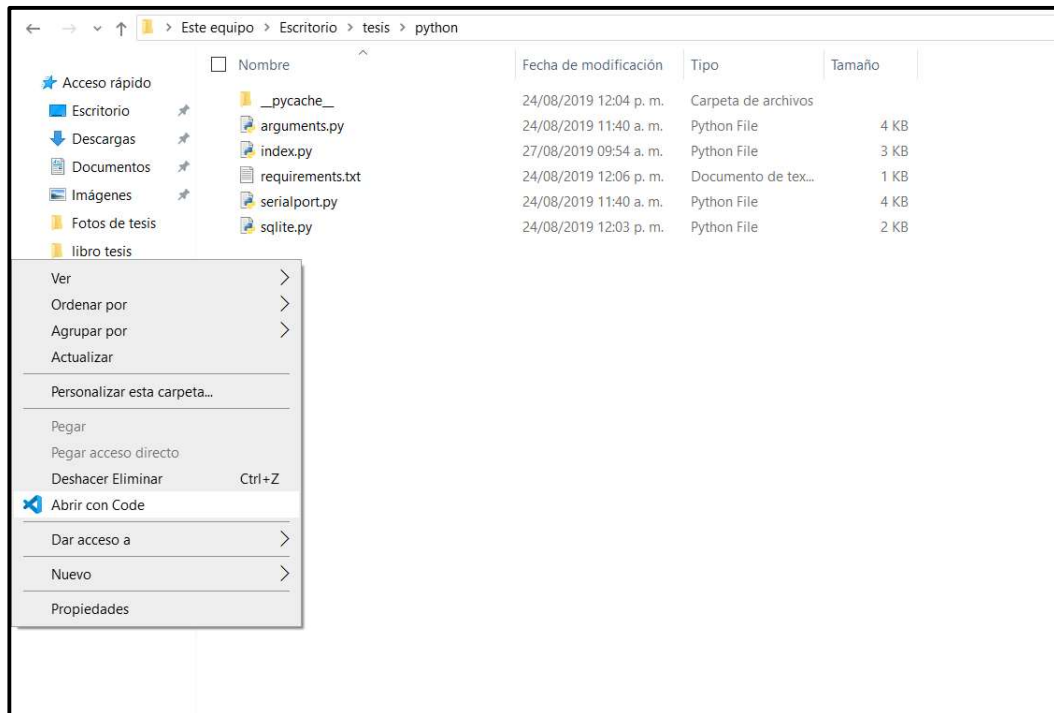


Figura 4.1 Ejecucion de archivos Python con Visual Code

Fuente: Autor

Una vez ejecutada la respectiva carpeta muestra la interfaz de Visual Code con los archivos desarrollados en Python como se observa en la figura 4.2, los mismos que serán utilizados para el funcionamiento del prototipo en la recolección de datos.

```

index.py >
34 database = sqlite3.connect('')
35
36 if arguments.get('truncate'):
37     database.query('drop table if exists measurements')
38     database.query('create table measurements(sensor_id varchar(100), measurement float, created_at datetime)')
39
40 main_loop = True
41 while main_loop:
42     try:
43         if not arguments.get('simulate'):
44             arduino = SerialPort.find()
45
46             sports = SerialPort.windows_ports
47             for index, port in enumerate(sports):
48                 # if port == 'com':
49                 #     del ports[index]
50
51             arduino = SerialPort.find()
52             arduino = SerialPort('com')
53         else:
54             arduino = SerialPortSimulator()
55
56         while True:
57             sensor_one_str = arduino.read_line()
58             sensor_one = int(sensor_one_str)
59             sql = measurements_query.format(name = '1', value = sensor_one, created_at = str(datetime.now()))
60             database.query(sql)
61
62     except KeyboardInterrupt:
63         main_loop = False
64     except Exception as error:
65         print(error)
66         arduino = None
67
68 if __name__ == '__main__':
69     main()
70

```

Figura 4.2 Programación del prototipo en Python con la interfaz de Visual Code
Fuente: Autor

4.1.1. Ejecución del software Python y SQLite

Procedemos a inicializar el código de Python para la ejecución se usa el comando `python .\index.py --truncate`, comenzara la recolección de datos que envíen los nodos sensoriales por medio del Xbee S2C a los nodos coordinadores, se puede observar en la figura 4.3

```

index.py >
48 # for index, port in enumerate(sports):
49 #     if port == 'com':
50 #         del ports[index]
51
52 arduino = SerialPort.find()
53 arduino = SerialPort('com')
54 else:
55     arduino = SerialPortSimulator()
56
57 while True:
58     sensor_one_str = arduino.read_line()
59     sensor_one = int(sensor_one_str)
60     sql = measurements_query.format(name = '1', value = sensor_one, created_at = str(datetime.now()))
61     database.query(sql)
62
63 except KeyboardInterrupt:
64     main_loop = False
65 except Exception as error:
66     print(error)
67     arduino = None
68
69 if __name__ == '__main__':
70     main()

```

```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL
python
2020-04-13 18:45:45.711868 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-13 18:45:45.711868")
2020-04-13 18:45:45.768774 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "8", "2020-04-13 18:45:45.768774")
2020-04-13 18:45:45.859576 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:45.859576")
2020-04-13 18:45:45.954542 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:45.954542")
2020-04-13 18:45:46.124885 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:46.124885")
2020-04-13 18:45:46.338530 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:46.338530")
2020-04-13 18:45:46.581079 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:46.581079")
2020-04-13 18:45:46.819768 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:46.819768")
2020-04-13 18:45:46.815252 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:46.815252")
2020-04-13 18:45:46.989771 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:46.989771")
2020-04-13 18:45:47.141865 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "9", "2020-04-13 18:45:47.141865")

```

Figura 4.3 Transmisión y lectura de datos del prototipo
Fuente: Autor

Los valores se guardan en una base de datos de SQLite, que previamente fue importada y creada en Python para su uso, esto facilito el trabajo gracias a la buena conexión entre las dos plataformas, véase la figura 3.13 donde se hace mención a los comandos utilizados para importar y crear el objeto directo para la base de datos.

La base se de datos se crea automáticamente una vez que se ejecuta los comandos en python mencionados anteriormente, como se observa en la Figura 4.4, la base de datos toma el nombre de database.sqlite3, es aquí donde se guardaran todos los datos recolectados por los nodos sensoriales del prototipo.

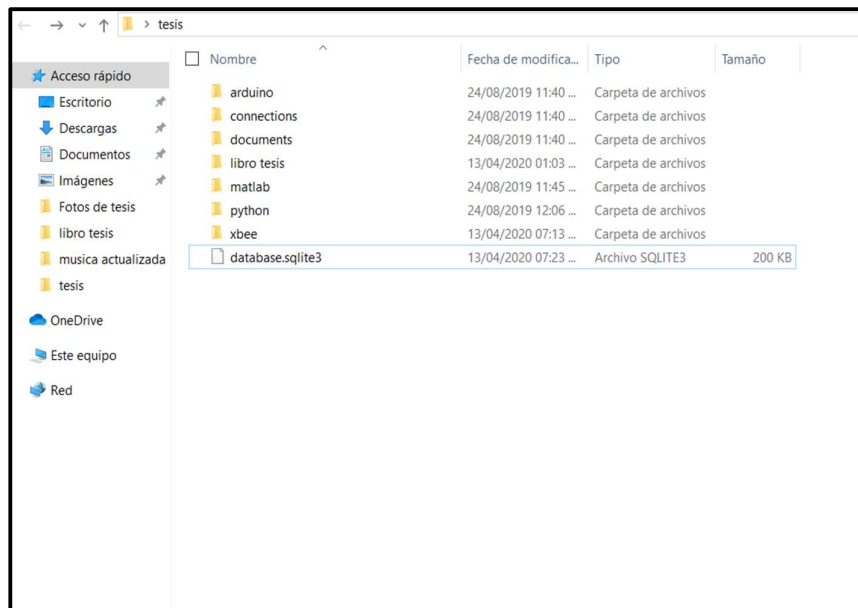


Figura 4.4 Base de datos creada con el registro de los sensores
Fuente: Autor

4.1.2. Cambio de ruta y procesamiento de datos con Matlab

Para el procesamiento de datos se va a utilizar Matlab, que es adecuado por su gran utilidad de herramientas matemáticas y procesos de ingeniería.

Se ejecuta el software Matlab y se cambia la ruta bin de Matlab por la ruta donde están los archivos creados para el funcionamiento y el esquema gráfico del proyecto, en este caso la carpeta tesis - Matlab.

En la Figura 4.5 se puede apreciar el cambio de ruta de archivos que contienen todos los documentos del proyecto en la plataforma Matlab.

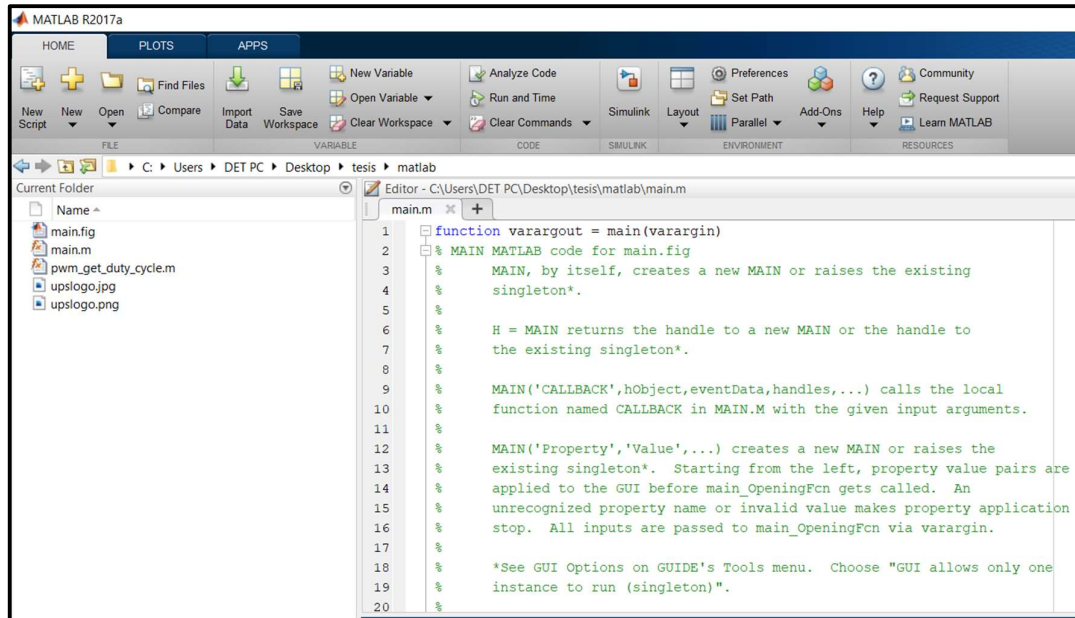


Figura 4.5 Cambio de ruta de archivos del proyecto

Fuente: Autor

4.1.3. Esquema estructural de la interfaz gráfica

En el software Matlab se procedió a crear el esquema estructural de una aplicación con una interfaz que permita graficar y hacer un análisis de los datos recogidos por los nodos sensoriales.

Para ejecutar la aplicación se a utilizar el comando **guide main.fig**, que lo que procede a realizar es a dar lectura al archivo main.fig que es la interfaz de la aplicación, este fue elaborado en el software Matlab.

En la Figura 4.6 se muestra el esquema estructural que tiene la aplicación interactiva desarrollada para el prototipo, una vez que se procese los datos recolectados por los nodos sensoriales encargados de monitorear la estructura.

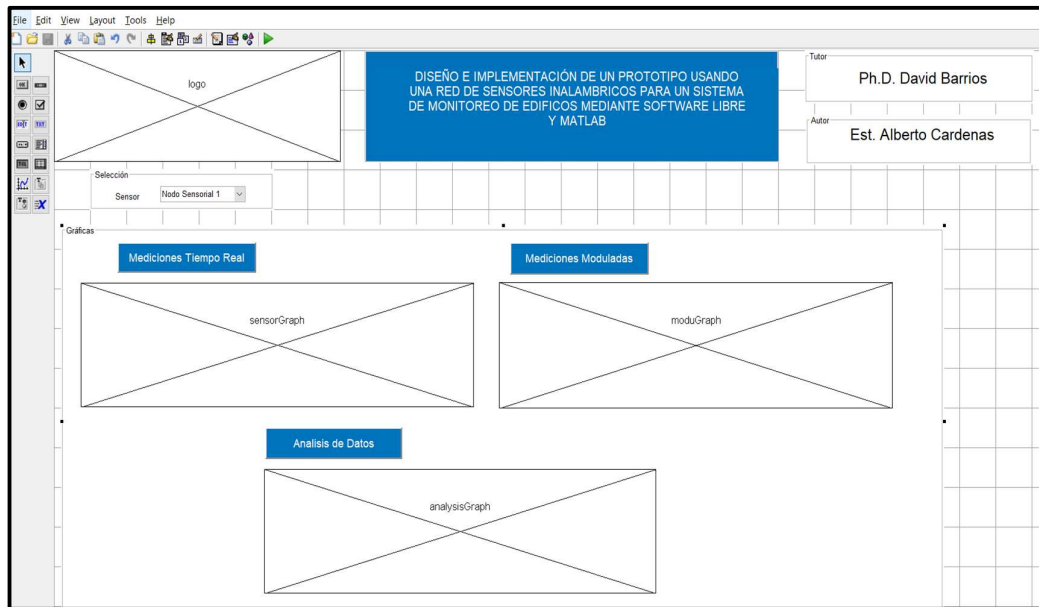


Figura 4.6 Esquema estructural de la interfaz gráfica

Fuente: Autor

4.1.4. Interfaz gráfica de la aplicación del prototipo

La interfaz gráfica del prototipo muestra una ventana muy interactiva, que cuenta con 4 botones independientes los cuales tienen su propia función, véase la figura 4.7.

- **Botón Sensor.-** Permite al usuario elegir que nodo sensorial va a utilizar durante la recolección de datos.
- **Botón de Mediciones Guardadas.-** Gráfica en tiempo real los datos guardados por los nodos sensoriales en la base de datos Sqlite3.
- **Botón Mediciones Moduladas.-** Realiza la modulación digital de los datos adquiridos en tiempo real por los nodos sensoriales, procediendo a limpiar la señal del ruido.
- **Análisis de Datos.-** Analiza los datos modulados, comparándolos con la tabla de frecuencia de la Norma Internacional Pan 50-Escocia.

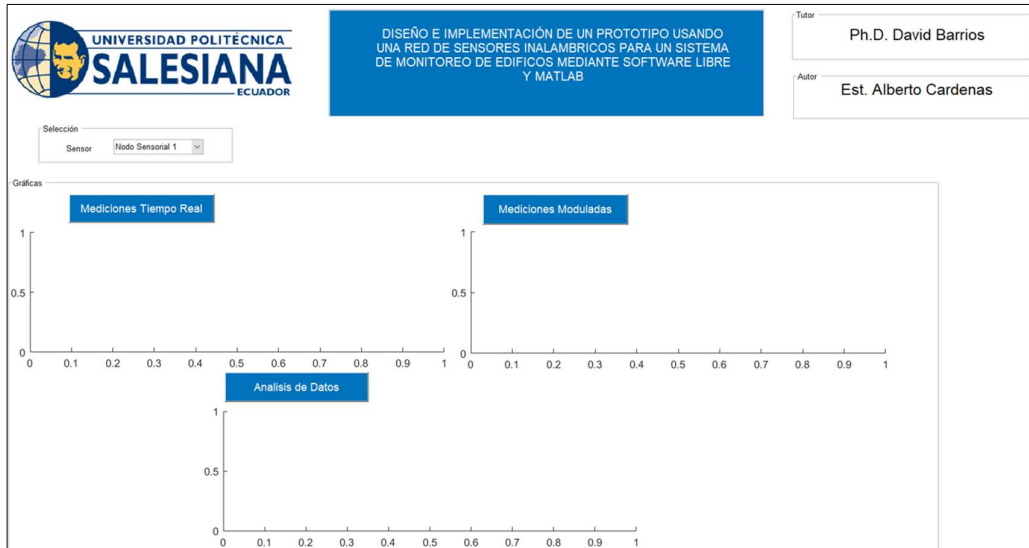


Figura 4.7 Interfaz gráfica del prototipo
Fuente: Autor

4.2. Pruebas realizadas con el prototipo.

Se procede al montaje del prototipo en una estructura de tres pisos y a la realización de las pruebas correspondientes, para probar su funcionamiento durante el monitoreo de salud estructural, se mantuvo el prototipo conectado por varios días hasta lograr captar señales de vibración por el paso de vehículos pesados, en la figura 4.8 se puede observar el montaje de un nodo sensorial en la pared de la estructura, este será el encargado de recolectar los datos.

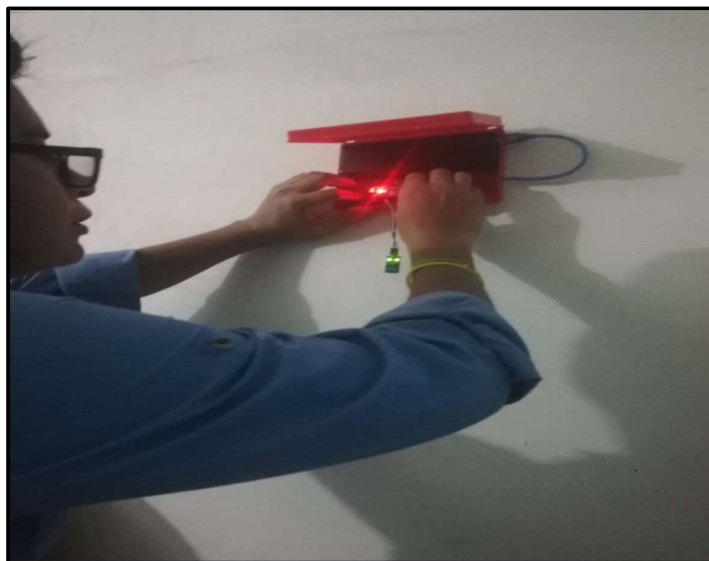


Figura 4.8 Montaje del nodo sensorial en la pared de la estructura
Fuente: Autor

Se realizan pruebas de monitoreo correspondiente, en este caso fue vibraciones ocurridas por tráfico pesado por la zona donde está ubicada la edificación de tres pisos, en la figura 4.9 se puede observar el nodo sensorial en alto y en funcionamiento.



Figura 4.9 Nodo sensorial en alto
Fuente: Autor

En la figura 4.10 se puede observar como los nodos coordinadores reciben los valores enviados inalámbricamente por los xbee S2C que están conectados en los nodos sensoriales, con la ayuda de python y se guardan en la base de datos SQLite.

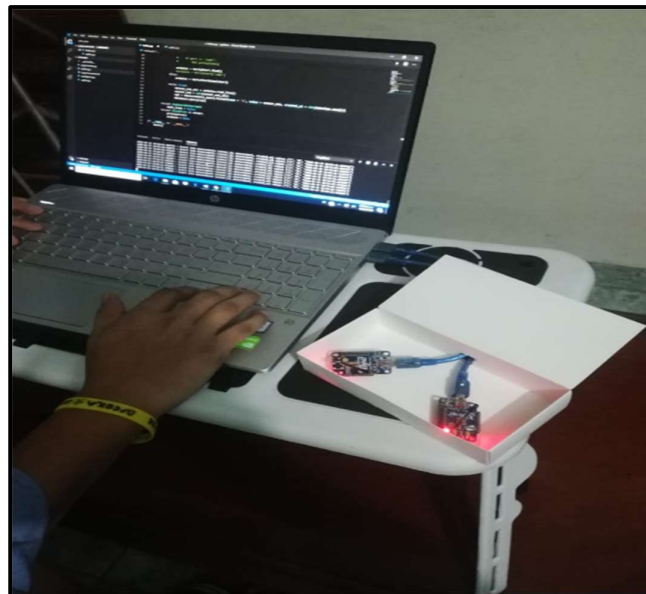


Figura 4. 10 Recepción de datos mediante el nodo coordinador
Fuente: Autor

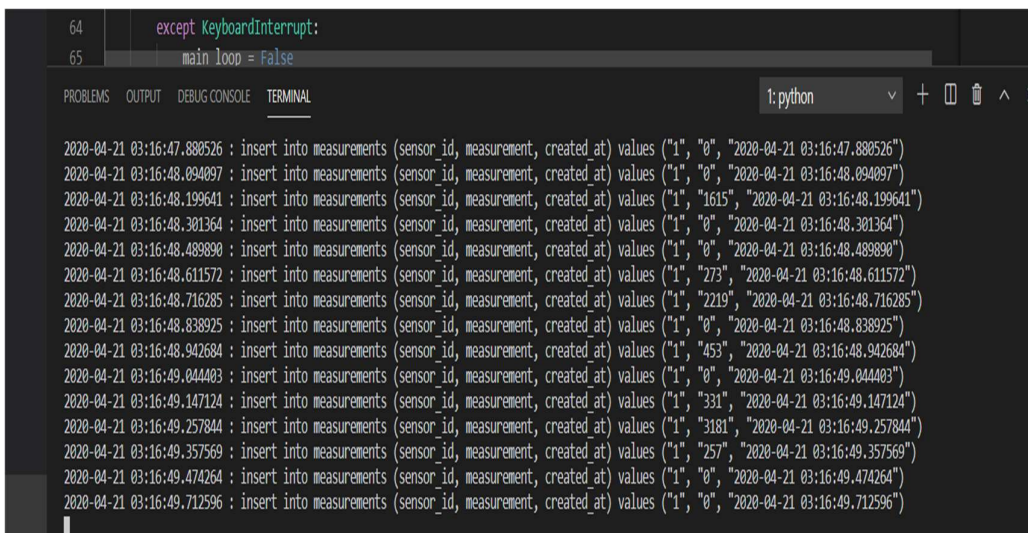
4.3. Análisis y recolección de datos analógicos-digital

Para la recolección de datos de forma analógica en tiempo real se utiliza el sensor Sw-420, junto con el Arduino nano programándolo con la función pulseIn que se puede observar en la figura 4.11, el sensor procede a recolectar todos los pulsos de vibración que emita la estructura.

```
long vibration (){\nlong measurement= pulseIn (SENSO_VIBRATION, HIGH); // wait for the pin to get HIGH and return measurement\nreturn measurement;
```

Figura 4. 11 Función pulseIn en Arduino para recolectar datos de forma analógica
Fuente: Autor

Los datos recolectados por el sensor de vibración son transmitidos por los xbeeS2C a los nodos coordinadores, el software libre Python procederá a capturar las vibraciones que recepte el sensor en tiempo real y guardarlo en una base de datos Sqlite3, esto se puede observar en la figura 4.12, como se capturan los datos para su previo procesamiento en Matlab mediante graficas de frecuencia con relación a las muestras obtenidas en un lapso de tiempo.



```
64     except KeyboardInterrupt:\n65         main loop = False\n\nPROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL 1: python + - X\n\n2020-04-21 03:16:47.880526 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:47.880526")\n2020-04-21 03:16:48.094097 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:48.094097")\n2020-04-21 03:16:48.199641 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1615", "2020-04-21 03:16:48.199641")\n2020-04-21 03:16:48.301364 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:48.301364")\n2020-04-21 03:16:48.489890 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:48.489890")\n2020-04-21 03:16:48.611572 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "273", "2020-04-21 03:16:48.611572")\n2020-04-21 03:16:48.716285 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "2219", "2020-04-21 03:16:48.716285")\n2020-04-21 03:16:48.838925 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:48.838925")\n2020-04-21 03:16:48.942684 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "453", "2020-04-21 03:16:48.942684")\n2020-04-21 03:16:49.044403 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:49.044403")\n2020-04-21 03:16:49.147124 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "331", "2020-04-21 03:16:49.147124")\n2020-04-21 03:16:49.257844 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "3181", "2020-04-21 03:16:49.257844")\n2020-04-21 03:16:49.357569 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "257", "2020-04-21 03:16:49.357569")\n2020-04-21 03:16:49.474264 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:49.474264")\n2020-04-21 03:16:49.712596 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 03:16:49.712596")
```

Figura 4. 12 Recolección de datos de forma analógica con Python
Fuente: Autor

En la siguiente Figura 4.13 se observa el procesamiento de datos en Matlab después de la recolección de datos de forma analógica, para su respectivo análisis.

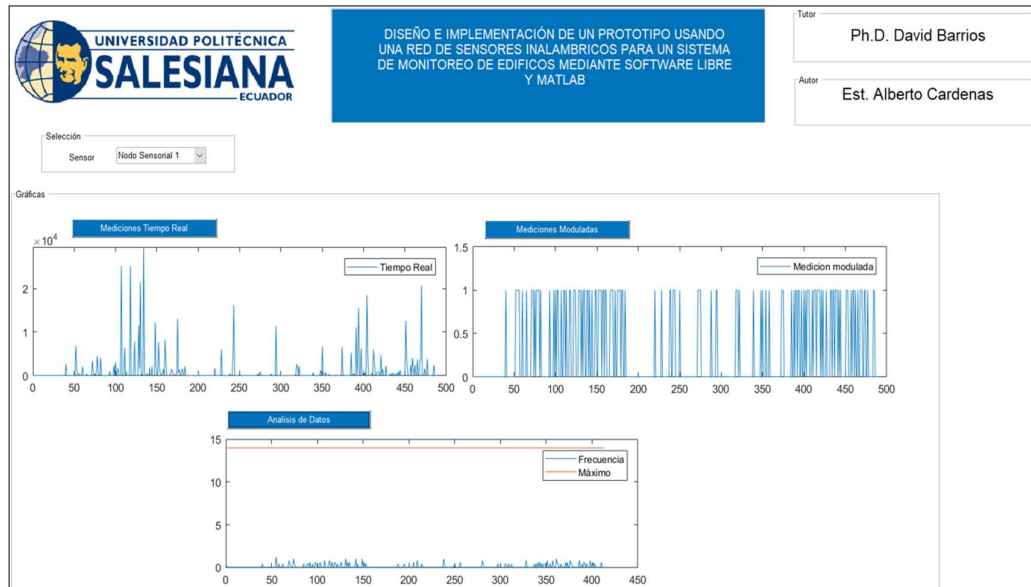


Figura 4. 13 Procesamiento general en Matlab de los datos analógicos recolectados por el nodo sensorial
Fuente: Autor

La Figura 4.14 muestra los valores de pulsos de vibración en tiempo real de manera analógica con una muestra de 500 valores en 20000 milisegundos.

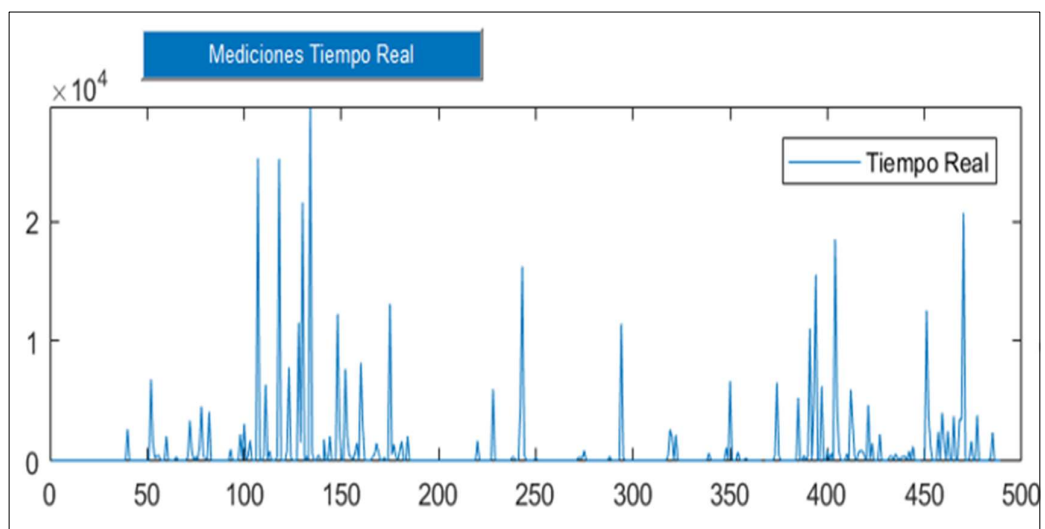


Figura 4. 14 Datos de pulsos de vibración en tiempo de real
Fuente: Autor

La Figura 4.15 se establece como la señal digital modulada donde los valores menores a 300 milisegundos se los filtra como un pico de caída que equivale a 0 y tomándolos como el ruido en la señal, y los valores mayores a 300 milisegundos se los estable como un 1 de pulso de señal de vibración que receptaron lo sensores.

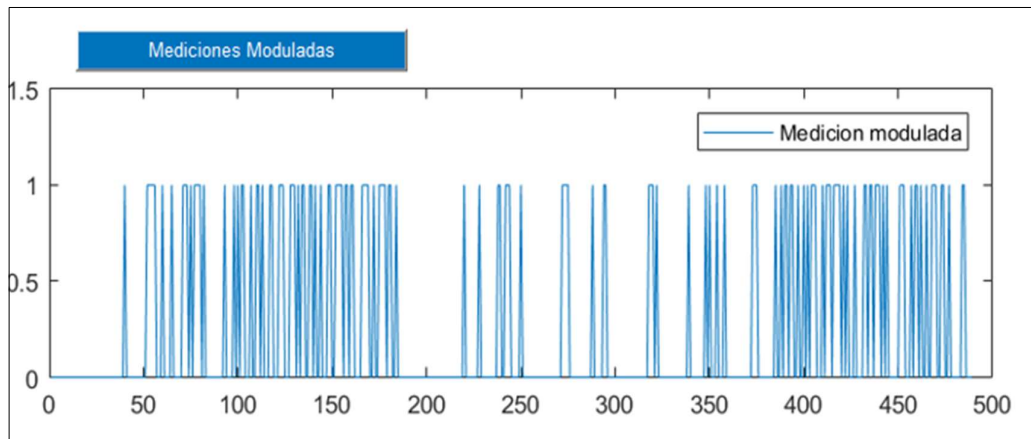


Figura 4. 15 Señal modulada libre de ruido

Fuente: Autor

La Figura 4.16 permite realizar una comparación de los valores obtenidos en la recolección de datos, posteriormente modulados, con la Tabla 2.6 de frecuencia de la norma Pan50-Escocia.

Bajo el criterio de la norma Pan50-Escocia, las frecuencias menores a 4 Hz podrían sufrir algún daño cosmético como formación de grietas finas, sin poner en peligro la estructura.

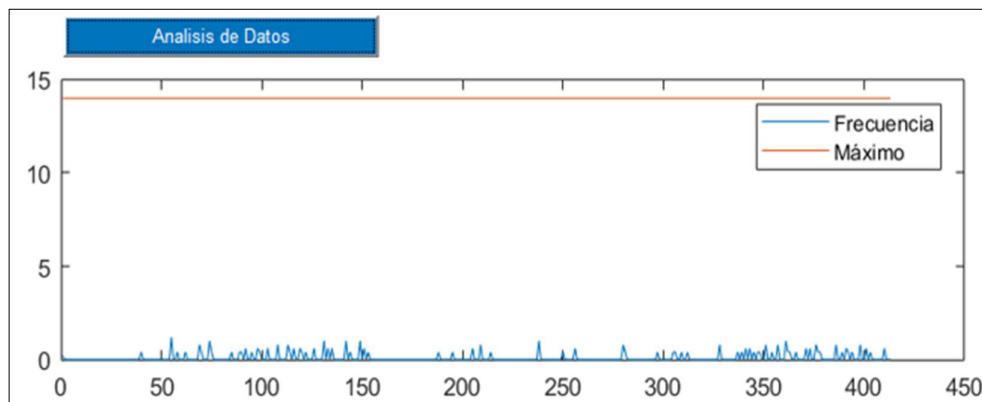


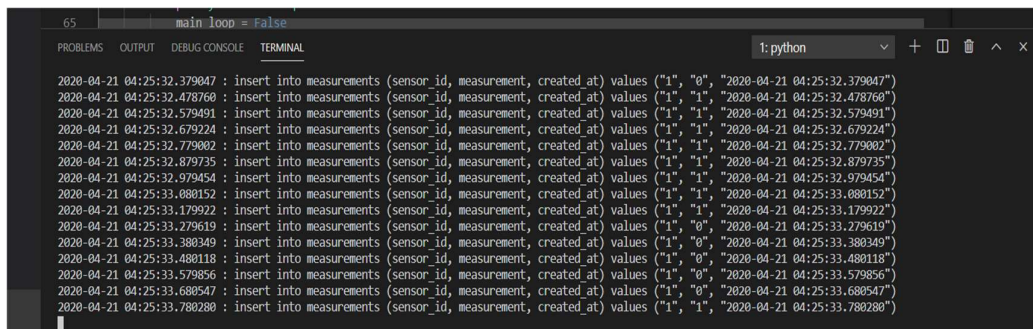
Figura 4. 16 Análisis de los datos analógicos con la tabla de frecuencia de la norma Pan50-Escocia

Fuente: Autor

4.4. Análisis y recolección de datos digital-digital

Para la recolección de datos de forma digital en tiempo real se utiliza el sensor Sw-420. Los datos obtenidos serán valores de 1 equivalente a vibración y 0 equivalente a sin vibración.

De la misma forma Python se encarga de recolectar los datos de los nodos sensoriales de forma digital en tiempo real y guardarlos en una base de datos Sqlite3, para su previo procesamiento en Matlab, como se muestra en la figura 4.17 a continuación.



```
65 main loop = False
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL 1: python
2020-04-21 04:25:32.379047 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 04:25:32.379047")
2020-04-21 04:25:32.478769 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:32.478769")
2020-04-21 04:25:32.579491 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:32.579491")
2020-04-21 04:25:32.679224 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:32.679224")
2020-04-21 04:25:32.779002 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:32.779002")
2020-04-21 04:25:32.879735 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:32.879735")
2020-04-21 04:25:32.979454 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:32.979454")
2020-04-21 04:25:33.080152 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:33.080152")
2020-04-21 04:25:33.179922 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:33.179922")
2020-04-21 04:25:33.279619 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 04:25:33.279619")
2020-04-21 04:25:33.380349 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 04:25:33.380349")
2020-04-21 04:25:33.480118 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 04:25:33.480118")
2020-04-21 04:25:33.579856 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 04:25:33.579856")
2020-04-21 04:25:33.680547 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "0", "2020-04-21 04:25:33.680547")
2020-04-21 04:25:33.780280 : insert into measurements (sensor_id, measurement, created_at) values ("1", "1", "2020-04-21 04:25:33.780280")
```

Figura 4. 17 Recolección de datos de forma digital con Python

Fuente: Autor

La Figura 4.18 hace referencia al procesamiento de los datos recolectados de manera digital por los nodos sensoriales, para su respectivo procesamiento en el software Matlab.

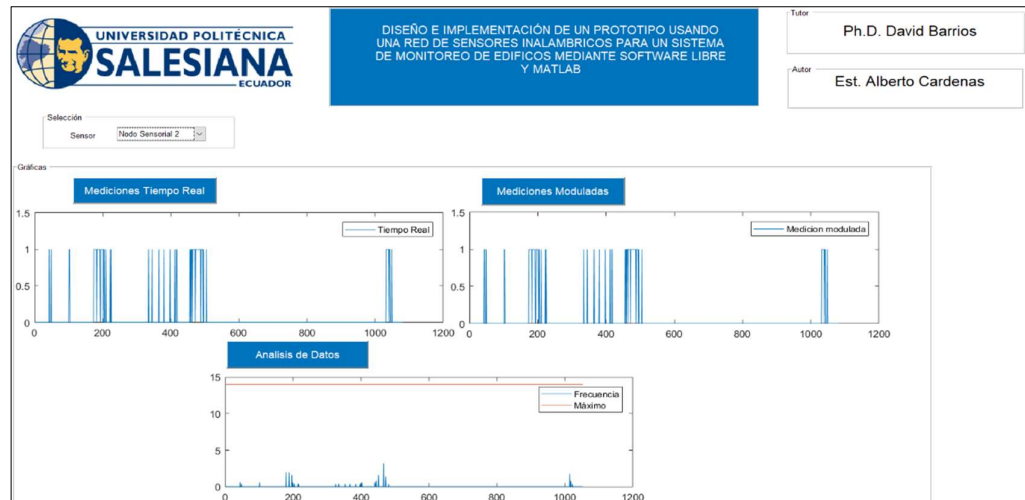


Figura 4. 18 Procesamiento de los datos de manera digital

Fuente: Autor

En la Figura 4.19 se muestra los datos digitales recolectados por el nodo sensorial y la señal modulada que es equivalente a la señal en tiempo real. El sensor lee datos de 1 como vibraciones y 0 sin vibraciones.

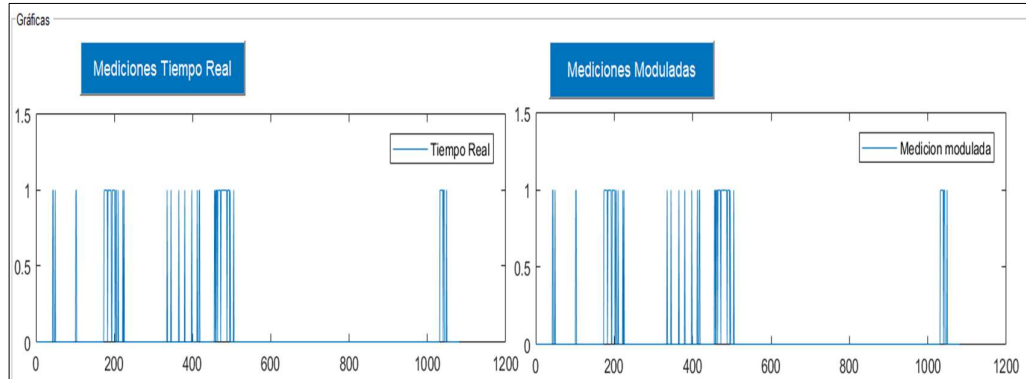


Figura 4. 19 Datos de vibración en tiempo real digitalizados
Fuente: Autor

La Figura 4.20 permite realizar una comparación de los valores de vibración digitales obtenidos en la recolección de datos, posteriormente comparados con la Tabla 2.6 de frecuencia de la norma Pan50-Escocia.

Bajo el criterio de la norma Pan50-Escocia, las frecuencias menores a 4 Hz, podrían sufrir algún daño cosmético como formación de grietas finas, casi no detectables y los valores entre 4 Hz y 10 Hz sufrirían un daño menor como formación de grietas en los bloques.

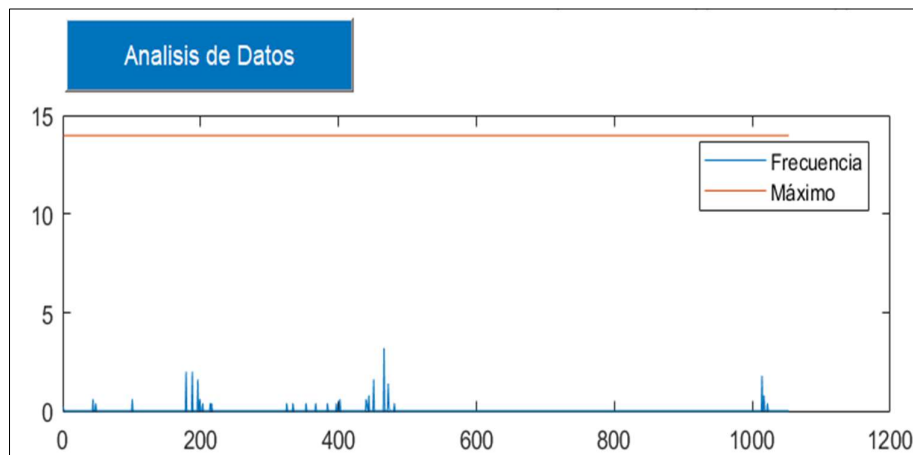


Figura 4. 20 Análisis de los datos digitales con la tabla de frecuencia de la norma Pan50-Escocia
Fuente: Autor

CONCLUSIONES

El estudio previo al desarrollo del proyecto es de vital importancia, pues permitirá conocer el funcionamiento que se desea lograr con el trabajo, gracias a esto se pueden concluir lo siguiente.

1. Mediante estudios realizados e incluidos en este trabajo de titulación se estima que existen varios métodos para lograr determinar posibles daños en las estructura, se puede dar a conocer el tiempo de vida útil de un edificio, partiendo de la vida útil de diseño de la estructura.
2. Existen varios tipos de redes inalámbricas, pero la correcta elección en proyectos portables de bajo presupuesto, hace referencia que la red WPAN que opera en el protocolo zigbee y fundamentados con la norma IEEE 802.15.4 sería la mejor opción para futuros trabajos, porque no requiere de una gran infraestructura.
3. Para el diseño de conexión de la red del prototipo se define usar una topología en estrella por sus bajas posibilidades de colapso del sistema, porque los nodos poseen caminos únicos de conexión y no existen dispositivos intermediarios, esto beneficia un eficiente tráfico de datos.
4. Al hablar de monitoreo es muy importante tener en cuenta que el prototipo tiene que estar conectado por mucho tiempo, el prototipo estuvo montado en una estructura de tres plantas para lograr obtener datos de vibración, ya sea generados por eventos sísmicos o tráfico pesado, en este proyecto se tomó datos por efectos de vibración generado por paso de vehículos pesados, se logró construir una maqueta sísmica para simular las pruebas de vibración generadas por eventos sísmicos, así demostrando su óptimo funcionamiento en el monitoreo de edificios.

RECOMENDACIONES

- Lograr un financiamiento privado para emplear una red de sensores inalámbrica a mayor escala con una mejor tasa de transmisión y procesamiento de datos, para el monitoreo de estructuras, bajo las normas y estándares de conexión de IEEE.
- Profundizar en el estudio de nuevos métodos para la detección y el monitoreo de daños en todo tipo de estructuras civiles, así como nuevas topologías de conexión para nuevos diseños de red.
- Realizar cursos de capacitación acerca de nuevos softwares libres, para una correcta configuración y programación de nuevos prototipos de monitoreo, y lograr desarrollar mejores aplicaciones de control.

BLOGRAFÍA

- Águila, A. (Recuperado 2019) Procedimiento de Evaluación de Riesgos Ergonómicos y Psicosociales. Tesis, Almería, España: Universidad de Almería.
- Aio, R. (10 de Agosto 2018). Diferentes tipos de edificios en función de su clasificación. Catalunya: <https://inversionesinmobiliariasaiio.com/>
- Archila, D., Santamaría, F. (2013) Estado del arte de las Redes de Sensores Inalámbricos. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Arduino Nano (S.F) Características del Arduino Nano. Obtenido de: <https://arduinodhtics.weebly.com/>
- Arduino. (2015) Que es Arduino. Chile, Obtenido de: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Arduino. (2015) Tipos de Arduino. Chile, Obtenido de: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Arencibia, J. (2008). Conceptos fundamentales sobre el mantenimiento de edificios. Revista de Arquitectura e Ingeniería. Matanzas, Cuba.
- 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.
- Botero, J.C. (2018) Sistema de Monitoreo de edificaciones. Colombia: Universidad EAFIT, obtenido de: <http://www.eafit.edu.co/innovacion/transferecia/Paginas/monitoreo-de-edificios.aspx>
- C. R. Farrar, K. Worden,.(2013) Structural health monitoring a machine learning perspective, 1st Edition, John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom.
- Camacho, P. (Enero 2019) Diseño de un Plan Modelo de Mantenimiento para Edificios del ICE. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- 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.
- 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/>

Corporación OSSO (2003) Reglamentación de Normas Internacionales de Análisis de Vibración. Cali, Colombia: obtenido de: <https://www.osso.org.co/>

Ebrahim, A. (2019) Tutorial De Python con SQLite3 (base de datos). Obtenido de: <https://likegeeks.com/>

El Comercio, (26 de mayo 2016) Cinco razones por las que los edificios se derrumban, Perú, obtenido de forma libre: <https://elcomercio.pe/casa-y-mas/arquitectura/cinco-razones-edificios-derrumban-211535-noticia/>

El Telégrafo, (2016).Cifra de muertos terremoto en Ecuador. [En línea] Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/ecuador/3/cifra-de-muertos-por-terremoto-en-ecuador-asciende-a-688>

Energiza, (2018) Análisis de vibraciones: Una tecnología clave del mantenimiento predictivo. Obtenido de forma libre, revista Energiza: www.energiza.org

Fan, W., Quiao, P. (2011) Vibration-based damage identification methods. Washington State University, Vol. 10, pp. 29-83.

García, C. (2012) Zigbee, Comunicación para Dispositivos. México. Obtenido de: Revista SG.com.

García, F. (2002). Mantenimiento y vida útil de los edificios. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Alicante. Alicante, España. <http://www.coaatalicante.org:8080/icce/articulo20>.

García, J., Rodríguez, R., Escobar, A. (2010) Detección de Daño en un Edificio a Escala Utilizando el Método de Rigideces Base. México: Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.

Hernández Moreno, S. (2015), Vida útil en el diseño sustentable de edificios, México, Trillas.

Hernández Moreno, S. (Octubre-Diciembre 2016), Como se mide la vida útil de los edificios, México: Universidad Autónoma del Estado de México

Hulin, J. (2017). Obras De Edificación Clasificación De Las Edificaciones Construcción Tradicional. Paper: Academia.edu.

IEEE Estándar 1451.5, (2015) Dispositivo de comunicación ZigBee. Obtenido de: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/1451.5-2007.html>

Kantor, P., Persico, D., Guzman, C. (2004) Estudio de Vibraciones en Edificios. Paper, Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.

Laboratorio Ingeniería Sísmica (2013) Modo de vibración de un edificio. Costa Rica, Universidad de Costa Rica Instituto de Investigaciones, obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/>

López, G. (2009). Encuesta Anual de Edificaciones; Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Ecuador: Dirección de Estudios Analíticos Estadísticos (DESAE)

M. Algaba, M. Solís, P. Galvín, (2010) Detección de daño en estructuras mediante la aplicación de la transformada Wavelet a su deflexión estática, Research Article.

Murada, Y. (2018) SQLite para Android: La herramienta definitiva. Obtenido de: <https://openwebinars.net/blog/sqlite-para-android-la-herramienta-definitiva/>

Nano Io Shield. (2017) Expansión Shield para arduino nano. ShenZhen, China. Obtenido de: <https://www.itead.cc/about-itead>

Nayibe, T., Burgos, T., Aparicio, L., Ortiz, L. (2011) Red de Sensores Inalámbricas. Bucaramanga, Colombia: Universidad Autónoma de Bucaramanga.

Norma 1451.5 IEEE (2007) Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats. IEEE STD 1451.0-2007.

Quintero, A., Villamizar, R. (junio 2010) Estado Del Arte En Monitorización De Salud Estructural: Un Enfoque Basado En Agentes Inteligentes. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Robledano, A. (2019) Python Características y Evolución .Recuperado de <https://openwebinars.net/>

Salazar, A. (20 de junio 2018). Tipos de construcción según su estructura. México: obtenido de <https://blog.laminasyaceros.com>.

Salazar, J. (2017) Redes Inalámbricas. Republica Checa, obtenido de: <http://www.techpedia.eu>.

Salvador, V. (Noviembre 2014) Detección de daño en edificios con técnicas de Minería de Datos. Tesis, México: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Sensor de Vibración Sw-420. (2019) Especificaciones Técnicas Sensor Sw-420. Carranza, México. Obtenido de: <https://sandorobotics.com/>

UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, (2015). Monitoreo de Edificios. (En línea). Disponible en: <https://techtransfer.universityofcalifornia.edu/NCD/24387.html>

Vargas, JC. (2015) Que es Matlab. Zacatecas, México.

Wen Yu, L. (19 de Septiembre 2018) Sistema antisísmico analiza salud estructural grandes edificaciones. México, obtenido de: <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/sistema-antisismico-analiza-salud-estructural-grandes-edificaciones>.

ANEXOS

El costo de implementación del proyecto es resumido a continuación el valor total de esta tesis será cubierto por su autor Wilson Alberto Cárdenas Sánchez.

PRESUPUESTO

Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal
Fuente Power Band Usb	2	\$ 25,00	\$ 50,00
Multi Usb	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Placa Arduino Nano	2	\$ 8,00	\$ 16,00
Xbee S2C	4	\$ 41,00	\$ 164,00
Xbee Usb Adapter	2	\$ 10,00	\$ 40,00
Cables para Conexión del Prototipo	1	\$ 15,00	\$ 15,00
ADXL335	2	\$ 6,00	\$ 12,00
Sensor SW-240	2	\$ 6,00	\$ 12,00
Curso de Programación Intermedia Python	2	\$ 250,00	\$ 250,00
Laptop HP Core I7	1	\$1150,00	\$ 1150,00
Caja Nodo Sensorial	2	\$10 ,00	\$ 20,00
Cajas Nodo Coordinador	2	\$ 8,00	\$ 16,00
Maqueta para simulación de Funcionamiento del Prototipo	1	\$ 250,00	\$ 250,00
Gastos de Ingeniería	1	\$200,00	\$ 100,00
TOTAL DE GASTOS			\$ 2105,00

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1. COMPRA DE EQUIPOS																									
1.1 COTIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS A USAR																									
1.2 COMPRA DE EQUIPOS E IMPLEMENTOS																									
1.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO																									
2. DISEÑO DEL PROTOTIPO																									
2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE ELECTRÓNICA																									
2.2 IMPLEMENTACIÓN DE LOS SENSORES																									
2.3 IMPLEMENTACIÓN DE LAS TARJETAS PROGRAMABLES																									
3. DESARROLLO DEL SOFTWARE																									
3.1 PROGRAMACIÓN EN PYTHON																									
3.2 PROGRAMACIÓN EN MATLAB																									
4. DISEÑO DE LA RED DE SENSORES																									
4.1 DISEÑO Y MONTADO DEL PROTOTIPO JUNTO A LA RED DE SENORES EN EL EDIFICIO																									
5. DESARROLLO DEL PROTOTIPO FINAL																									
5.1 VERIFICACIÓN DE FUNCIONAMIENTO Y PRUEBAS																									
5.2 REALIZACIÓN DE CORRECCIONES Y PRESENTACION DEL PROYECTO.																									