

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
INALÁMBRICO CON DISPOSITIVOS XBEE APLICADO AL
MONITOREO CONTINUO DE VIBRACIONES EN EL
EDIFICIO D DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

EDGAR IVAN BARRERA GRANADOS

NESTOR AMILCAR LÓPEZ ORANTES

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

M. Sc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
INALÁMBRICO CON DISPOSITIVOS XBEE APLICADO AL
MONITOREO CONTINUO DE VIBRACIONES EN EL
EDIFICIO D DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

Presentado por:

EDGAR IVAN BARRERA GRANADOS

NESTOR AMILCAR LÓPEZ ORANTES

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M. Sc. e ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

SAN SALVADOR, FEBRERO DE 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M. Sc. e ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, miércoles 12 diciembre de 2018, en el aula de postgrado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- MSC. JOSE WILBER CALDERON URRUTIA
(Docente Asesor)


Firma

- MSC. SALVADOR DE JESUS GERMAN


Firma

- MSC. RICARDO ERNESTO CORTEZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INALÁMBRICO CON DISPOSITIVOS XBEE APLICADO AL MONITOREO DE VIBRACIONES EN EL EDIFICIO D DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

A cargo de los Bachilleres:

- BARRERA GRANADOS EDGAR IVAN

- LOPEZ ORANTES NESTOR AMILCAR

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

9.1

(NUEVE . UNO)

AGRADECIMIENTOS

La honra y gloria sea para Dios que me ha acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por darme salud, fortaleza y sabiduría permitiéndome culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mis padres, Napoleón Amilcar López Motho y Ana Delia Orantes de López por todo su amor, apoyo, comprensión, sacrificio y porque todo lo que soy se lo debo a ellos que inculcaron en mí la importancia de estudiar y superarme.

NESTOR AMILCAR LÓPEZ ORANTES.

ÍNDICE

Índice de ilustraciones.....	iv
Índice de tablas	vi
Lista de siglas.....	vii
Introducción	1
Objetivos.....	2
Alcances.....	3
Antecedentes.....	4
Justificación	5
Capítulo 1.....	6
1.1 Sismos en El Salvador.....	6
1.2 Redes de sensores inalámbricos	6
1.2.1 Definición de redes de sensores inalámbricos.....	6
1.3 Vibraciones en edificaciones.....	7
1.3.1 Aspectos básicos.....	7
1.3.2 Objetivo de la medición.....	7
1.3.3 Variables medidas en vibraciones.....	8
1.3.4 Reglamentación internacional.....	9
1.3.4.1 Norma DIN 4150.....	9
Capítulo 2.....	10
2.1 Protocolo ZigBee.....	10
2.1.1 Definición y características.....	10
2.1.2 Tipos de nodos ZigBee.....	11
2.1.2.1 Coordinador.....	11
2.1.2.2 Router.....	11
2.1.2.3 Dispositivos finales	12
2.1.3 Topologías	12
2.1.3.1 Topología árbol.....	12
2.1.3.2 Topología malla	13
2.1.3.2.1 Mecanismo de ruteo.....	13
2.1.3.2.2 Transmisión de datos y enrutamiento.....	13
2.1.4 Las capas del protocolo ZigBee.....	14
2.1.4.1 Capa física (PHY).....	15
2.1.4.2 Capa de control de acceso al medio (MAC)	16

2.1.4.3	Capa de red.....	16
2.1.4.4	Capa de aplicación (AP).....	16
2.1.4.4.1	Capa de soporte de aplicación (APS).....	17
2.1.5	Claves de seguridad.....	17
2.1.6	Empaquetamiento.....	17
2.1.7	Modelos de comunicación en el protocolo 802.15.4.....	18
2.1.7.1	Punto a punto.....	18
2.1.7.2	Punto a multipunto.....	18
2.2	Módulos XBee.....	19
2.2.1	Módulos XBee.....	19
2.2.2	Series de módulos XBee.....	19
2.2.3	I/O en módulos XBee.....	20
2.2.4	Direccionamiento.....	21
2.2.5	Antenas, señal y rangos de frecuencia.....	21
2.2.6	Protocolos de comunicación por radio compatibles con XBee.....	22
2.2.7	Tipos de redes con XBee.....	23
2.2.8	Comunicación inalámbrica y serie.....	23
2.2.9	Modos de operación.....	24
2.2.9.1	Modo transparente.....	24
2.2.9.2	Modo comando.....	25
2.2.9.2.1	Limitaciones del modo transparente.....	26
2.2.9.3	Modo API.....	27
2.2.9.3.1	Ventajas del modo API.....	27
2.2.9.3.2	Estructura de una trama API.....	28
2.2.9.3.3	Tipos de trama API.....	30
2.2.10	Seguridad y cifrado.....	33
2.2.11	Ahorro de energía.....	33
2.2.12	XCTU.....	34
Capítulo 3	37
3.1	Instrumentación.....	37
3.1.1	Acelerómetros 9DOF MPU.....	37
3.1.2	IMU MPU-9250.....	38
3.2	Protocolos de comunicación.....	39
3.2.1	Protocolo I2C.....	39

3.2.2	Protocolo SPI	40
3.3	Raspberry Pi	40
3.3.1	Descripción de Raspberry Pi.....	40
3.3.2	Especificaciones técnicas.....	41
3.3.3	GPIO.....	42
3.4	Pantalla táctil.....	42
3.5	Microcontrolador Atmega328P	43
3.5.1	Descripción del microcontrolador Atmega328P.....	43
3.5.2	Especificaciones técnicas.....	43
3.6	Almacenamiento de datos.....	44
3.6.1	Google Drive.....	44
3.6.2	Insync.....	44
3.7	Python.....	45
3.7.1	Librerías utilizadas de python.....	45
3.7.1.1	XLWT	45
3.7.1.2	XLRD.....	46
3.7.1.3	XLUTILS	46
3.7.1.4	NUMPY	46
3.7.1.5	MATPLOTLIB	46
3.7.1.6	TIME.....	47
3.7.1.7	OS	47
3.7.1.8	REPORTLAB	47
3.7.1.9	STRING	48
3.7.1.10	PYSERIAL	48
3.7.1.11	SUBPROCESS	48
3.7.1.12	CRONTAB	48
3.7.1.13	SYS	48
3.7.1.14	TKINTER	49
3.8	Shield microSD	49
3.9	Shield RTC	49
3.10	Diseño PCB.....	50
3.11	Diagrama de bloques	52
3.12	Estuche protector a partir de tecnología de impresión 3D.....	52
3.13	Sistema de alimentación ininterrumpido	53

Capítulo 4.....	56
4.1 Resultados del proyecto.....	56
4.1.1 Interfaz gráfica	56
4.1.1.1 Descripción de interfaz gráfica.....	57
4.1.2 Evaluación de los datos almacenados	61
4.1.2.1 Hoja de cálculo	62
4.1.2.2 Generación de gráficos	64
4.1.2.3 Análisis de gráficos	66
4.1.2.4 Reportes	69
4.1.2.5 Interpretación de los resultados	71
4.1.2.6 Comparación técnica y económica con equipo comercial.....	72
Recomendaciones	73
Conclusiones.....	74
Referencias bibliograficas.....	75
Anexos	78
Anexo I: Tablas de costos del proyecto	78
Anexo II: Diagrama de flujo del algoritmo de ejecución en cada nodo sensor	79
Anexo III: Diagrama de flujo del algoritmo de ejecución de los códigos en Python	80
Anexo IV: Diagrama de conexión del nodo sensor del sistema de adquisición de vibraciones...	83
Anexo V: Glosario	84
Anexo VI: Manual de usuario para interfaz gráfica.....	88

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Topologías ZigBee.....	12
Ilustración 2. Capas que componen el protocolo ZigBee	15
Ilustración 3. Pines I/O para módulos XBee.....	21
Ilustración 4. Configuración de dirección de destino	25
Ilustración 5. Estructura comando AT	26
Ilustración 6. Comunicación en modo API.....	27
Ilustración 7. Estructura de una trama API.....	28

Ilustración 8. Estructura de una trama para transmitir datos	30
Ilustración 9. Estructura de una trama para recepción de datos.....	31
Ilustración 10. Estructura de una trama que indica el estado del paquete enviado.....	32
Ilustración 11. Pines de módulo XBee para modo sleep	34
Ilustración 12. Módulos XBee en XCTU	35
Ilustración 13. Dispositivos MPU-9250	38
Ilustración 14. Raspberry Pi 3 modelo B+.....	41
Ilustración 15. Numeración de GPIO en Raspberry Pi 3 modelo B+	42
Ilustración 16. Pantalla táctil TFT 3.5" de 320 x 480 pixeles para Raspberry Pi	42
Ilustración 17. Módulo microSD	49
Ilustración 18. Módulo RTC DS3231	50
Ilustración 19. PCB lado de componentes del sistema electrónico	50
Ilustración 20. PCB lado de pistas del sistema electrónico	51
Ilustración 21. Diagrama de bloques del sistema electrónico de adquisición de vibraciones	52
Ilustración 22. Estuches protectores de plástico con diferentes aditivos	53
Ilustración 23. PCB del sistema de alimentación.....	53
Ilustración 24. Módulo TP4056.....	54
Ilustración 25. Módulo step up booster DC-DC	54
Ilustración 26. Baterías de litio Panasonic 18650 3400mAh.....	55
Ilustración 27. Nodos sensores momento previo a ser instalados en el edificio D.....	56
Ilustración 28. Nodos instalados en cada uno de los 4 pisos del edificio D	56
Ilustración 29. Ventana de inicio	57
Ilustración 30. Ventana de tareas	57
Ilustración 31. Ventana de tareas - Barra de menú	58
Ilustración 32. Ventana información del sistema.....	59
Ilustración 33. Ventana de tareas-información del sistema	59
Ilustración 34. Ventana de tareas - Sistema Manual.....	60
Ilustración 35. Ventana de tareas-Revisar Datos	61
Ilustración 36. Hoja de cálculo obtenido al procesar datos	61
Ilustración 37. Datos proporcionados por los módulos sensores	62
Ilustración 38. Columnas correspondientes a las velocidades	63

Ilustración 39. Columnas correspondientes a los desplazamientos	63
Ilustración 40. Gráficos obtenidos al procesar datos	64
Ilustración 41. Ilustración 41. Contenido de una carpeta de gráficos	65
Ilustración 42. Gráficos grupales por magnitud.....	66
Ilustración 43. Gráfico tiempo vs aceleración eje X.....	67
Ilustración 44. Gráfico tiempo vs giroscopio eje X	67
Ilustración 45. Gráficos grupales en reporte	68
Ilustración 46. Gráficos individuales en reporte	69
Ilustración 47. Medidor de vibración PCE-VM con pantalla LCD	72

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores guía máximos para velocidad de partícula DIN4150:1999	9
Tabla 2 Características de los módulos XBee y XBee Pro	20
Tabla 3 Identificador de API.....	29
Tabla 4 Tabla de especificaciones Raspberry PI 3 modelo B+	41
Tabla 5 Resumen de parámetros técnicos del microcontrolador Atmega328P	43
Tabla 6 Aceleraciones y velocidades RMS resultantes en cada piso del edificio	71

Lista de siglas

<i>Siglas</i>	<i>Significado</i>
API	Application programming
RX	Recepción
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog to digital converter
AES	Advanced encryption standard
ALU	Arithmetic logic unit
AODV	Ad hoc on demand distance vector routing
APS	Application support
BIT	Binary digit
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
DIN	Deutsches institut für normung
DMP	Digital motion processor
DOF	Degree of freedom
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
EIC	Escuela de Ingeniería Civil
EIE	Escuela de Ingeniería Eléctrica
FIA	Facultad de Ingeniería y Arquitectura
GHz	Gigahercio
GPIO	General purpose input/output
Hz	Hert o Hertz
I2C	Inter-integrated circuit
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
IMU	Inertial measurement unit
ISM	Industrial scientific medical
MAC	Medium access control
MEMS	Micro electro mechanical system

<i>Siglas</i>	<i>Significado</i>
MHz	Megahercio
MPU	Multiple process unit
OSI	Open system interconnection
PAN	Personal area network
RF	Radiofrecuencia
RISC	Reduced instruction set computer
RSSI	Received signal strength indicator
RTC	Real time clock
SAI	Sistema de alimentacion interrumpida
SBC	Single board computer
SCL	System clock
SDA	System data
SNET	Servicio nacional de estudios territoriales
SPI	Serial peripheral interface
TX	Transmisión
UES	Universidad de El Salvador
USART	Universal asynchronous receiver-transmitter
WSN	Wireless sensor networks
XCTU	Configuration and test utility
ZDO	Zigbee device object

Introducción

Las vibraciones en edificaciones siempre han sido de gran interés de estudio, ya que, tienen un enorme potencial de daño tanto a la infraestructura misma como a vidas humanas. Dichos efectos perjudiciales depende de diversas características de las vibraciones tales como amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencias, etcétera y de las propiedades de comportamiento dinámico de los sistemas que excitan. Es de gran importancia la medición, registro y control de dichas vibraciones debido a que los datos ofrecen la posibilidad de entender sus características y efectos a corto y largo plazo sobre las edificaciones, y de esa manera plantear medidas de prevención de daños a infraestructura y a las personas que hacen uso del edificio.

El presente documento muestra el diseño e implementación de un sistema electrónico capaz de capturar y almacenar las vibraciones en edificaciones; dichos datos son enviados de manera inalámbrica a un nodo central para su posterior análisis. Se utiliza el protocolo ZigBee a través de los módulos de radiofrecuencia XBee, el cual está basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE 802.15.4. Se explica el funcionamiento de dichos protocolos así como las características y capacidades de los módulos XBee utilizados en los prototipos.

Finalmente se detallan los resultados obtenidos en la investigación, mediante la evaluación del funcionamiento de los sistemas electrónicos diseñados para el monitoreo de vibraciones que por motivos del presente trabajo de graduación fueron instalados en el edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar un sistema electrónico con comunicación inalámbrica utilizando módulos XBee protocolo 802.15.4 para la medición y registro continuo de vibraciones del Edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Objetivos específicos

- Implementar un sistema electrónico para el monitoreo de vibraciones en el edificio D de Ingeniería y Arquitectura.
- Implementar la tecnología XBee para el envío y recepción de datos de manera inalámbrica.
- Utilizar un servicio de alojamientos de archivos en la nube para el almacenamiento de las mediciones continuas de aceleraciones.
- Generar reportes y gráficos con los análisis de los datos obtenidos.
- Diseñar e implementar un sistema de respaldo de alimentación eléctrica ante un corte del suministro primario.
- Proporcionar la ubicación geográfica de la estructura de interés donde se instala el sistema.

Alcances

Se busca realizar una estación de monitoreo telemétrica de las vibraciones ocurridas en el edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura – FIA de la Universidad de El Salvador-UES, utilizando una red inalámbrica basada en tecnología XBee y con una cobertura que incluirá los cuatro pisos de dicha estructura teniendo como nodo central la escuela de ingeniería eléctrica. La estación reportará datos recopilados por los cambios detectados en los acelerómetros instalados en los pisos del edificio y mediante procesos matemáticos se obtendrá valores de desplazamiento, velocidad y vibraciones, además cada dato incluirá la fecha y hora en que ocurre el fenómeno. Estos datos serán enviados periódicamente utilizando una conexión a internet, almacenando estos en hojas de cálculo donde podrán realizar reportes que incluirán gráficos de los datos de interés.

El sistema incluirá un módulo de respaldo de alimentación eléctrica que garantizará que ante un corte en el suministro eléctrico de la red local este pueda seguir operando durante un periodo de tiempo adecuado. Además, el sistema proporcionara el estado de operación en el que se encuentra cada uno de los nodos de la red inalámbrica incluyendo los puntos de medición.

Antecedentes

El Salvador por su ubicación geográfica se caracteriza por ser un país altamente sísmico, es de conocimiento general que se han tenidos grandes fenómenos de grandes magnitudes en diferentes ocasiones, esto sumado a fenómenos cotidianos tanto naturales como originados por el humano causan en toda estructura vibraciones que pueden resultar sensibles o simplemente pasar desapercibidas por el usuario.

Dado que El Salvador es un país altamente concentrado en la capital donde el desarrollo es creciente y en particular el incremento de la población se ha optado principalmente por la implementación de proyectos urbanos enfocados en la construcción vertical o de altura, estas estructuras resultan ser las más vulnerables a los fenómenos que originan vibraciones.

Durante la última década en el país se ha aumentado el número de estructuras sometidas a vibraciones y de igual manera ha aumentado el número y la magnitud de vibraciones, principalmente a causa de factores sociales y económicos, como por ejemplo el tráfico y obras civiles.

Justificación

La Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador es una ejemplificación clara de edificios altamente vulnerables a las vibraciones, con estructuras que datan de los años 60 y que han sufrido movimientos telúricos de gran magnitud, aunque se han realizado procesos de reconstrucción la vulnerabilidad sigue latente y es importante tenerlo en cuenta.

Conocer las condiciones de vibración a la que es sometida la estructura del edificio D de la FIA que no solo se imparten clases de distintas materias sino también es utilizado como oficinas administrativas de la escuela de arquitectura.

El departamento de estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil – EIC de la facultad no cuenta con un dispositivo que le permita determinar la magnitud de parámetros de interés cuando ocurre una vibración, por lo tanto la implementación de un sistema inalámbrico para el monitoreo de vibraciones abre las puertas ante un proceso de verificación de la estructura y de ser necesario la aplicación de actividades preventivas o correctivas.

El almacenamiento de los datos en hojas de cálculos alojadas en la nube permite ya no depender de un dispositivo físico para guardar las lecturas que periódicamente se realizara de igual manera los reportes generados y los gráficos permiten una mejor interpretación de las mediciones obtenidas y todo es accesible por cualquier usuario con los permisos necesario y que posea una conexión a internet.

Capítulo 1

1.1 Sismos en El Salvador.

El Salvador es un país pequeño con alta actividad sísmica. La Red de Vigilancia del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) registró durante el año 2002, 5,568 sismos, de los cuales el 36% se generaron dentro del territorio salvadoreño y el 64% en el Océano Pacífico o en los países vecinos. En promedio, se tuvieron 15 sismos por día y 9 sismos por mes (107 al año) reportados como sentidos por la población salvadoreña. Entre los años 1997 y 2002 se registraron 39120 sismos. (*Actividad sísmica en El Salvador durante el año 2002 en comparación con la sismicidad de años anteriores 1997-2001, 2002, pág. 1, recuperado: <http://www.snet.gob.sv/Publicaciones/pu040311.pdf>*)

Uno de los terremotos más destructivos que El Salvador ha experimentado fue el que aconteció el 10 de octubre de 1986, dejó 1500 fallecidos, un centenar de desaparecidos, 10 mil heridos de diversas gravedades y otros 15 mil sin hogar y trabajo, al quedar dañadas más de sesenta mil viviendas y tres mil negocios según cifras oficiales.

También el terremoto acontecido el 13 de enero de 2001 con 45 segundos de duración provoca destrucción generalizada en 172 municipios del país. Un mes más tarde, exactamente el 13 de febrero, ocurre otro terremoto con una duración de 20 segundos, dejó graves daños a su paso. (*13 terremotos que han azotado a El Salvador, 2016, recuperado: <https://goo.gl/v5WcWz>*)

1.2 Redes de sensores inalámbricos

1.2.1 Definición de redes de sensores inalámbricos.

Una red de sensores inalámbricos, “Wireless Sensor Networks” (WSN) consiste en una red de sensores distribuidos en una zona geográfica para monitorear magnitudes físicas como temperatura, presión, humedad, etc. Se caracterizan por ser redes que requieren un reducido consumo de energía y dependiendo de los requerimientos de la aplicación a desarrollar se selecciona el protocolo de comunicación inalámbrico más adecuado. Algunos de los estándares disponibles incluyen radios de 2.4 GHz basados en los estándares IEEE 802.15.4, ZigBee o IEEE 802.11 (Wi-Fi). (*Redes Inalámbricas, 2016, recuperado: <https://goo.gl/bVX86r>*).

En una red de sensores inalámbricos una vez efectuada una medida la información es transformada en digital en el propio nodo y transmitida a una estación base donde se almacena y

es tratada temporalmente para ir a un servidor con mayor capacidad. Una Raspberry Pi puede actuar como estación base en el que se encarga de recolectar los datos sensados en la red.

1.3 Vibraciones en edificaciones

1.3.1 Aspectos básicos.

Las vibraciones causadas por terremotos siempre han sido de gran interés de estudio, ya que, tienen un enorme potencial de daño tanto a infraestructura como a vidas humanas. Pero hay otro tipo de vibraciones, aquellas generadas por el ser humano que también pueden incidir en la integridad de las estructuras y causar sensaciones molestas. Su conocimiento, evaluación y control es creciente, a medida que las fuentes de estas vibraciones aumentan en presencia y potencia, viéndose incrementado de esa manera el potencial de daños. También existe un interés en la medición, registro y control de este tipo de vibraciones porque estos datos ofrecen la posibilidad de entender sus características y efectos a corto y largo plazo sobre las edificaciones, y de esa manera plantear medidas de prevención de daños a infraestructura y a las personas que hacen uso del edificio.

Muchos procesos de la actividad humana en una sociedad industrializada generan vibraciones: tráfico vehicular, maquinaria de construcción, maquinaria industrial. El potencial de efectos perjudiciales depende de diversas características de estas vibraciones como amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencias, etcétera y de las propiedades de comportamiento dinámico de los sistemas que excitan (frecuencia de resonancia y resistencia, principalmente).

1.3.2 Objetivo de la medición.

En la medición de vibraciones, el objetivo es detectar y registrar el movimiento vibratorio que es causado por fuerzas que pueden variar en magnitud y dirección. Esta información puede ser utilizada para interpretación sismológica, caracterización y comparación con las normas de control de vibraciones, cálculos de dinámica de estructuras, etc.

Si la medición se realiza en alguna clase de estructura civil, entonces hay que tener en cuenta que el registro, alterado por la estructura geológica, es la respuesta de esta estructura a la vibración del suelo.

El problema básico conectado con la medición de vibraciones es el de establecer un punto fijo en el espacio donde se realizarán las mediciones. Durante el paso de la energía sísmica, todo

el medio está en movimiento, al igual que el instrumento de medición, como resultado no se puede realizar una medición absoluta del movimiento, al menos no con los medios convencionales disponibles. Los instrumentos diseñados para medir vibraciones, en general llamados sismómetros, establecen un punto interno dentro de ellos que permanece relativamente quieto respecto al suelo o carcasa durante el paso de las vibraciones; las vibraciones son entonces medidas como el cambio en la posición entre el punto interno del sensor y el suelo o carcasa.

1.3.3 Variables medidas en vibraciones.

En medición de vibraciones es requerido registrar tres componentes ortogonales ya sea de la variable desplazamiento de partícula, velocidad o aceleración, y que estén en función del tiempo.

Las tres variables: desplazamiento de partícula, velocidad y aceleración están relacionadas analíticamente por $a = dv/dt$, $v = dx/dt$. Así, la medida de uno de los parámetros permite en principio la determinación de cualquiera de los otros dos. Sin embargo, debido a las inexactitudes inherentes en los cálculos numéricos, es deseable y recomendado medir el parámetro particular de interés directamente.

El desplazamiento se define como la distancia entre la posición actual y la posición de referencia. Aparte de un desplazamiento variable, un objeto vibrando presenta también una velocidad variable y una aceleración variable. La velocidad es la proporción de cambio en el desplazamiento y se mide en *pulg/s* o *mm/s*. La aceleración es la proporción de cambio en la velocidad y se mide en g (la aceleración promedio debida a la gravedad en la superficie de la tierra) o mm/s^2 .

Cuando el desplazamiento está en su máximo, la velocidad vale cero, porque esa es la posición en la que la dirección del movimiento se invierte. Cuando el desplazamiento vale cero (en el punto de equilibrio), la velocidad estará en su máximo. La aceleración es la proporción del cambio de velocidad. Cuando la velocidad está en su máximo, la aceleración vale cero ya que la velocidad no cambia en ese momento. Cuando la velocidad vale cero, la aceleración está en su máximo en ese momento dado que es cuando más rápido cambia la velocidad.

Es común hacer mediciones de aceleraciones en el área de vibraciones de estructuras, ya que, las aceleraciones están relacionadas directamente con las fuerzas inerciales en las estructuras. (*Diagnóstico de vibraciones, 25 de enero 2018, recuperado: <https://goo.gl/PgamqV>*).

1.3.4 Reglamentación internacional.

Existen normas internacionales que pueden ser usadas como referencia para comparar las mediciones de vibraciones que se realicen en edificaciones. Estas normas internacionales se basan en principios físicos, así como en miles de observaciones de los efectos de las vibraciones sobre una gran cantidad de topología estructural. Prácticamente todas las normas internacionales de manejo de vibraciones han sido desarrolladas a partir del parámetro velocidad y las mediciones fueron realizadas a partir de instrumentos que miden este parámetro, es por esto que es deseable medir esta y no otra variable.

Los valores máximos de velocidades de partícula permitidos o recomendados varían de una norma a otra, por lo que solo se muestra la más exigente de las normativas internacionales, la cual es la norma alemana DIN 4150.

1.3.4.1 Norma DIN 4150.

El criterio de prevención más exigente en lo que respecta a normativas internacionales para control de vibraciones, es la norma alemana DIN 4150, con una velocidad máxima de la partícula de 5mm/s, para viviendas y edificios. La norma DIN 4150 establece los valores máximos de velocidad de vibración (mm/s) en función de la frecuencia, para evitar daños en diferentes tipos de edificaciones como, por ejemplo: comercial, viviendas, edificios, industrias y otros. La velocidad depende de la energía que porta la onda y que puede ser transmitida a la edificación, mientras que la frecuencia, ciclos de vibración por segundo, determina en parte la eficiencia de la transmisión de energía.

Clase de construcción	Frecuencia fundamental (Hz)		
	1 a 10	10 a 50	50 a 100
Edificaciones industriales, oficinas y similares.	20	20 - 40	20 - 40
Edificaciones residenciales y construcciones similares	5	1 - 15	15 - 20
Otras edificaciones sensibles a vibraciones.	3	3 - 8	8 - 10

*Tabla 1. Valores guía máximos para velocidad de partícula en mm/s DIN4150:1999.
Fuente: Norma DIN 4150 (Vibration in buildings - part 3: Effects on structures., 2001, pág. 89)*

Capítulo 2

2.1 Protocolo ZigBee.

2.1.1 Definición y características.

El protocolo ZigBee es basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE 802.15.4. Creado por ZigBee Alliance, una organización, teóricamente sin ánimo de lucro, de más de 200 grandes empresas (destacan Mitsubishi, Honeywell, Philips, Invensys, entre otras), muchas de ellas fabricantes de semiconductores.

ZigBee utiliza la banda libre de 2.4GHz y además realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir, de un canal. Normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles. El alcance depende de la potencia de emisión del dispositivo, así como el tipo de antenas utilizadas (cerámicas, dipolos, tipo chip, etc.). El alcance normal con antena dipolo en visión directa suele ser aproximadamente (en la versión de 1mW de potencia) de 100m y en interiores de unos 30m. La velocidad de transmisión de datos de una red ZigBee es de hasta 250kbps. Una red ZigBee la pueden formar, teóricamente, hasta 65,535 equipos, es decir, el protocolo está preparado para poder controlar en la misma red esta cantidad enorme de dispositivos. La realidad es menor, siendo, de todas formas, de miles de equipos.

Este estándar se utiliza mayoritariamente para aplicaciones domóticas y automatización donde sea mínima la necesidad de transferencia de información. ZigBee se utiliza para controlar la calefacción, iluminación, sistema de seguridad, etc. de cualquier edificio inteligente.

ZigBee posee una arquitectura basada en el modelo OSI. El estándar IEEE 802.15.4 define las dos capas más bajas: la capa Física y la capa de Control de Acceso al Medio. Estas capas son utilizadas por ZigBee para crear un marco de trabajo para las aplicaciones. La capa Física puede trabajar en uno de tres rangos de frecuencias: 868 MHz, 915 MHz o 2.4 GHz con velocidades de hasta 20 Kbps, 40 Kbps y 250 Kbps y una latencia abajo de los 15 ms. Tiene 11 canales en los rangos 868 y 915 MHz. Y para el rango de transmisión de 2.4 GHz tiene 16 canales. Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permite que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema. Además, es un protocolo de comunicación multisalto, es decir, que se puede establecer comunicación entre dos nodos aun cuando estos se encuentren fuera del rango de transmisión, siempre y cuando existan otros nodos intermedios que

los interconecten, así, se incrementa el área de cobertura de la red. Su topología de malla (MESH) permite a la red auto-repararse sin intervención humana, aumentando su confiabilidad. Una red ZigBee la forman básicamente 3 tipos de elementos. Un único dispositivo coordinador, dispositivos routers y dispositivos finales. Soporta tres tipos de topologías de red:

- 1) Star o Estrella: presenta larga vida útil como consecuencia del bajo consumo que requiere.
- 2) Mesh o Malla: en la cual existen múltiples rutas para alcanzar un destino.
- 3) Cluster Tree o Racimo de Árbol: es una topología del tipo Mesh-Star que encierra los beneficios de ambas.

2.1.2 Tipos de nodos ZigBee.

2.1.2.1 Coordinador

Es obligatoria la presencia de solo un nodo coordinador dentro de la red el cual debe ser el responsable del arranque de la red, configurar los parámetros de red, admisión de nodos a la red y asignación de direcciones de red.

El Coordinador establece el canal de comunicaciones y del PAN ID (identificador de red) para toda la red, la cual, deben poseer todo aquel dispositivo que desee comunicarse en la red. Pueden existir varias redes, pero cada red deberá tener únicamente un solo coordinador. Una vez establecido el identificador de red, el coordinador puede permitir unirse a él dispositivos routers y endpoints. Dentro de la red el coordinador puede cumplir las funciones de router al participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de la información.

Para formar una red, el Coordinador selecciona un canal, que no esté siendo utilizado de los 16 canales disponibles. Esto es posible ya que el Coordinador realiza un monitoreo de la energía utilizada en cada uno de los canales. El dispositivo cuenta con un terminal (pin 15) que oscilará a una frecuencia de 1Hz para notificar al usuario que la inicialización fue satisfactoria.

2.1.2.2 Router

Es un nodo que crea y mantiene información sobre la red para determinar la mejor ruta para transmitir un paquete de información. La utilidad de éstos es para extender la cobertura de la red y para aumentar la confiabilidad con la creación de rutas adicionales de datos.

2.1.2.3 Dispositivos finales

Los dispositivos finales están obligados a interactuar con el Coordinador o con los Router pero no pueden enviar información directamente a otros dispositivos finales, ya que, no pueden enrutar paquetes. Una ventaja que tienen los dispositivos finales es que su consumo de energía es menor al no realizar funciones de enrutamiento.

2.1.3 Topologías

El protocolo ZigBee al basarse en el estándar IEEE 802.15.4 hereda sus topologías en cuanto a la transferencia de datos y además agrega las topologías de árbol y de malla que se muestran en la ilustración 1. Debido al poco alcance de cada nodo, frecuentemente un paquete debe ser retransmitido varias veces por intermedio de ruteadores. Una característica muy destacable es que el ruteo en cualquier topología usada se hace en la capa de red y gracias a ello no es necesaria ninguna programación adicional en la capa de aplicación.

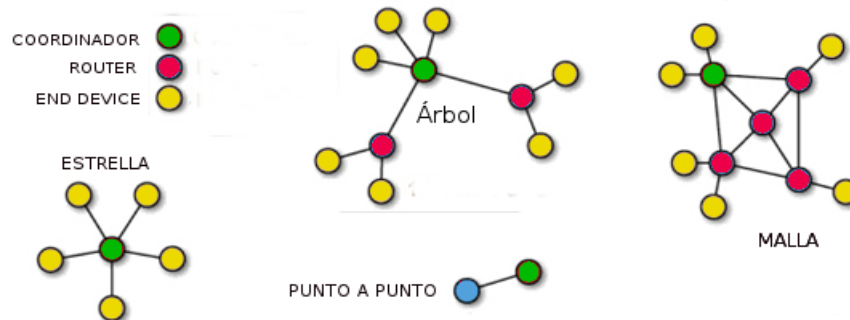


Ilustración 1. Topologías ZigBee

2.1.3.1 Topología árbol

Entre las más importantes características se pueden mencionar:

- Los nodos ruteadores pueden tener nodos hijos.
- Hay comunicación directa solo a través de la relación padre-hijo.
- Ruteo jerárquico con un único camino posible entre 2 nodos.

Algunas de las propiedades de la relación padre-hijo son: Solo pueden ser padres el nodo coordinador o los nodos ruteadores. En cada momento el nodo hijo tiene solo un padre. Un hijo

puede cambiar de padre. La jerarquía ZigBee puede interpretarse como un árbol en donde el coordinador es la raíz y los nodos finales son las hojas.

2.1.3.2 Topología malla

Es una extensión de la topología de comunicación entre pares (peer to peer). Características:

- Los nodos ruteadores pueden tener nodos hijos.
- Hay comunicación directa entre dos nodos ruteadores siempre que estén separados a una distancia menor al rango de transmisión entre ellos.
- Los nodos terminales solo pueden intercambiar datos con sus respectivos nodos padres.
- Es posible el ruteo dinámico. El mejor paso es una optimización de gasto energético, tiempo, seguridad y confiabilidad.

2.1.3.2.1 Mecanismo de ruteo.

En el algoritmo implementado en la capa de red hay un balance entre costo por unidad, gasto de batería, complejidad de implementación para lograr una relación costo desempeño adecuada a la aplicación. Un algoritmo muy utilizado por su simplicidad y bajo requerimiento de procesamiento es el AODV (Ad hoc On-Demand distance Vector). En AODV los nodos mantienen una tabla de ruteo para los destinos conocidos. En el comienzo esta tabla la integran sus vecinos. Solo se agrandará la tabla cuando aparezca algún nodo con camino desconocido. En este caso se envía mensajes de descubrimiento que se propagan entre los nodos hasta llegar al destino. Desde el destino se inicia el camino inverso hasta llegar al nodo origen. Todos los nodos actualizarán sus tablas.

2.1.3.2.2 Transmisión de datos y enrutamiento.

- **Unicast:** Una transmisión unicast está dirigida a un dispositivo específico, la comunicación se lleva cabo a través de reintentos y reconocimientos (paquetes ACK) para garantizar la entrega de la información. Por otro lado, si un paquete ACK de la red no se recibe dentro del tiempo que le tomaría a un paquete atravesar la red dos veces, se produce una retransmisión del paquete.

- **Broadcast:** Una transmisión de broadcast es recibida y repetida por todos los nodos en la red. En este tipo de transmisión no se utilizan los paquetes ACK (reconocimientos). Es posible que el receptor reciba varias copias del mismo paquete de información, pero el módulo receptor descartará los duplicados. Por otra parte, para evitar colisiones de paquetes se introduce un retardo aleatorio antes de que cada nodo retransmita el mensaje de difusión. Cabe destacar que la dirección de broadcast es una dirección de 64 bits donde los 16 bits menos significativos son 1 y los más significativos valen 0, es decir, 0xFFFF. El envío frecuente de un mensaje de difusión puede reducir rápidamente el ancho de banda disponible en la red por lo que debe ser utilizado con moderación.
- **Enrutamiento:** Un nodo dentro de una red malla es capaz de determinar rutas confiables usando el algoritmo de enrutamiento derivado de AODV, que es el protocolo de enrutamiento para redes inalámbricas ad hoc, que no son más que redes descentralizadas debido a que no dependen de una infraestructura preexistente. Además, una tabla asociativa es usada para asignar la dirección del nodo destino con el próximo salto, enviando el mensaje al siguiente salto, pueden ocurrir dos cosas o bien el mensaje es entregado o será reenviando para un nodo intermedio.

2.1.4 Las capas del protocolo ZigBee

El estándar ZigBee permite la interoperabilidad entre diferentes dispositivos de diferentes fabricantes. Por ejemplo, nos permitiría controlar sistemas de climatización, riego automático, etc. de diferentes marcas usando un mismo protocolo con productos certificados ZigBee. Para lograr esta interoperabilidad entre dispositivos, el protocolo ZigBee está constituido por diferentes capas (similar al modelo OSI); las cuales son independientes una de la otra. Además, cuenta con un módulo de seguridad, que es quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo ZigBee, que es quien se encarga de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

En la ilustración 2 se observan las capas que conforman el protocolo ZigBee las cuales son: capa física (PHY) y capa de control de acceso al medio (MAC) especificadas por el estándar IEEE 802.15.4, capa de red (NWK) y capa de aplicación.

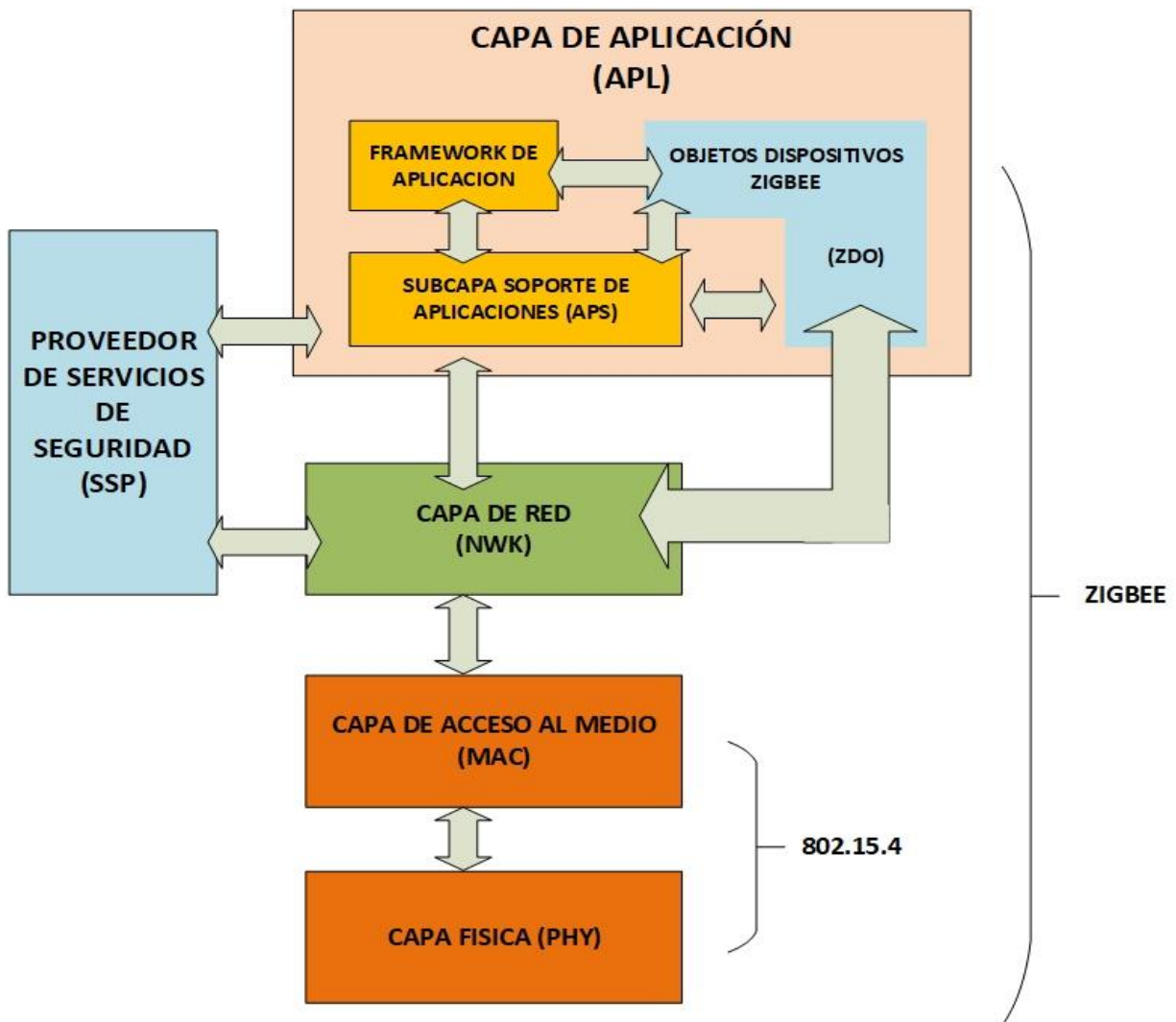


Ilustración 2. Capas que componen el protocolo ZigBee

2.1.4.1 Capa física (PHY)

La capa física en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4. El estándar trabaja sobre las bandas ISM (Médica, Industrial y Científica) de uso no regulado, dónde se definen hasta 16 canales en el rango de 2.4 GHz, cada una de ellas con un ancho de banda de 5 MHz. La capa física es capaz de detectar la energía en un canal dado y ese dato lo envía a la capa MAC por medio de un entero de 8 bits. Antes de transmitir en un canal, el dispositivo debe medir el nivel de energía en ese canal, tarea que realiza la capa física. Esta

medición solo indica si el canal está ocupado, pero no se puede saber si esa energía corresponde a otro dispositivo 802.15.4 o no. La sensibilidad del receptor se define como la energía mínima necesaria de la señal entrante que permita ser detectada y demodulada con un error en los paquetes menor al 1 %. El estándar 802.15.4 admite una diferencia de 10dB entre la sensibilidad del receptor y el nivel mínimo de energía detectable. Por ejemplo si la sensibilidad del receptor es de -70dBm debe poder medir energías de -60dBm . El rango de medición que exige el protocolo es de 40 dB lo que en este ejemplo determinaría un intervalo de medición de energía de -60dBm a -20 dBm.

2.1.4.2 Capa de control de acceso al medio (MAC)

La capa MAC provee una interfase entre la capa física y la próxima capa sobre la de MAC que en el caso de ZigBee es la de red.

2.1.4.3 Capa de red

Esta capa cumple la función de iniciar la red, unir o separar dispositivos a la red, implementar seguridad, cifrar y autenticar paquetes, encaminar tramas a sus respectivos destinos, asignar direcciones de red y garantizar la entrega del paquete de información al destino final; además, es responsable de crear nuevas redes y asignar direcciones a los dispositivos de la misma. Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta, es decir, árbol, estrella y mesh network. El algoritmo de enrutamiento que se usa es el de enrutamiento de malla, el cual se basa en el protocolo Ad Hoc On-Demand Vector Routing (AODV).

2.1.4.4 Capa de aplicación (AP)

La capa de aplicación es la que habilita la interoperabilidad entre dispositivos de diferente fabricante. Está constituida por la subcapa APS (Application Support) y la subcapa ZDO (ZigBee Device Object). La subcapa APS trata de descubrir también a otros dispositivos que están operando en su mismo espacio operativo. Los ZDO se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si actuará como coordinador, ruteador o dispositivo final.

2.1.4.4.1 Capa de soporte de aplicación (APS)

La capa Soporte de Aplicación cumple la función de mantener el rol que el nodo juega en la red, ya sea como coordinador, router o dispositivo final. También debe filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de soporte de aplicación ofrece una interfaz entre la red y la capa de aplicación, define los mensajes estandarizados que permite la comunicación entre dispositivos de diferentes fabricantes.

2.1.5 Claves de Seguridad

La seguridad en una red utilizando el protocolo ZigBee es basada en el uso de claves de enlace y de red, por ejemplo, en una comunicación entre dos dispositivos de red, la seguridad se basa en claves de 128 bits entre los dos dispositivos. Por otro lado, cuando se envía un mensaje tipo broadcast, también las claves para la seguridad se establecen de 128 bits entre todos los dispositivos de la red.

Las claves de 128 bits pueden ser adquiridas por un dispositivo mediante el establecimiento de la clave o puede ser preinstalada por el fabricante. Para el establecimiento de la clave de red se obtiene previamente una clave de enlace basándose en una clave maestra. Esta clave maestra puede estar instalada de fábrica. La clave de red tiene que ser usada por la capa MAC, la capa de red y la capa de aplicación de ZigBee. Las claves maestras y las de enlace solo pueden ser usadas en la subcapa de soporte de aplicación (APS). Es importante mencionar que la clave maestra y la clave de enlace deben estar disponibles solo en la capa de aplicación (APL).

2.1.6 Empaquetamiento.

En el protocolo ZigBee, existen cuatro tipos de paquetes básicos, los cuales son: paquete de datos que tiene una extensión de hasta 104 bytes, paquete acknowledgement (ACK) el cual indica que el mensaje se ha recibido por parte del receptor, el paquete de la capa de control de acceso al medio (MAC) y el paquete de baliza. Cada trama de comunicación esta numerada para asegurar que todos los paquetes llegan a su destino y existe un campo al final de cada paquete que sirve para corroborar que el paquete se ha recibido sin errores. A continuación, se describe cada tipo de paquete básico:

- Los paquetes ACK, son conocidos también como paquetes de reconocimiento, sirven como una realimentación desde el receptor al emisor, para confirmar que el paquete se ha recibido sin errores. Es posible incluir un tiempo de espera entre cada trama, para enviar un paquete ACK después de la transmisión de cada paquete de datos.
- 2. El paquete MAC, es de gran importancia debido a que hace posible para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos de manera remota. Por ejemplo, una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia. Es posible configurar un dispositivo de red ya sea como router o como dispositivo final en la red implementada.
- 3. El paquete baliza se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estos paquetes son importantes para mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

2.1.7 Modelos de Comunicación en el protocolo 802.15.4

Existen dos tipos de comunicación y en ambos casos es bidireccional:

- Punto a punto
- Punto a multipunto

2.1.7.1 Punto a punto

Para que la comunicación entre dos módulos sea exitosa, deben comunicarse en el mismo canal y en la misma red, además es necesario saber la dirección MAC de 64-bit del destinatario. La forma en que se comunican dos módulos punto a punto depende si están en modo API o transparente.

2.1.7.2 Punto a multipunto

Esta comunicación implica un nodo central coordinador con varios nodos remotos (end devices) conectándose al nodo central, conocido también como topología tipo estrella. Todos los dispositivos deben estar conectados a la misma red. En el protocolo 802.15.4 los módulos XBee tienen dos roles: El rol como coordinador que actúa como nodo central de la red, inicia la red, permite a otros dispositivos conectarse, seleccionar la frecuencia del canal y hace la

sincronización de la red. Y el rol como dispositivo final siendo un nodo remoto de la red. Puede comunicarse con el coordinador y con otros dispositivos finales de la red.

Es posible hacer broadcast, es decir, mandar el mismo dato a todos los nodos posible de la red. Para mandar un broadcast, la dirección destino debe ser 000000000000FFFF.

2.2 Módulos XBee.

2.2.1 Módulos XBee

XBee es el nombre comercial de una familia de módulos de comunicación por radio y están basados en el estándar ZigBee. Los módulos XBee son fabricados por la empresa Digi International, los cuales ofrecen una gran variedad de combinaciones de hardware, protocolos, antenas y potencias de transmisión. Pueden ser utilizados para reemplazar un par de cables en una comunicación serial. Los transmisores XBee trabajan bajo el protocolo ZigBee. Estos son utilizados para formar redes de Área Personal (PAN) que están constituidos por un Coordinador y equipos terminales. Los módulos XBee funcionan a 3.3V y pueden trabajar en conjunto con un microcontrolador al utilizar las líneas de transmisión de datos por medio de los pines TX y RX pero debe utilizarse un nivelador de voltaje que funcione como intermediario entre los 5V del microcontrolador y los 3.3V del módulo XBee para evitar dañar este último. Además, proporcionan una interfaz serial para un enlace de radiofrecuencia; convirtiendo datos seriales en datos de radiofrecuencia que pueden ser enviados a cualquier dispositivo en una red.

Los módulos XBee más comunes son los módulos XBee S2 y los módulos XBee S1. La principal diferencia existente entre ambos es que la Serie 2 sí permite hacer redes tipo malla. Además, existen los mencionados XBee Pro, que permiten mayor alcance y potencia de señal.

2.2.2 Series de módulos XBee.

La compañía Digi International ofrece una gran variedad de módulos XBee, a continuación, se mencionan algunos de ellos.

XBee Series 1 (también llamados XBee 802.15.4) – Son la serie más fácil de utilizar, no necesitan ser configurados y se utilizan principalmente para comunicaciones punto a punto. El hardware de las Series 1 y las Series 2/2.5/ZB no son compatibles.

XBee ZB (el actual módulo Series 2) – Estos a menudo son llamados módulos de Serie 2 y deben ser configurados antes de ser usados. Pueden funcionar en modo Transparente o en modo API, depende de cual firmware se configure en los módulos. La característica más destacable es que es posible implementar redes tipo malla con estos módulos.

XBee 2B (módulo Series 2) – Son nuevos módulos que poseen mejoras en el hardware respecto de los de la Serie 2, básicamente son los mismo que los anteriores, pero con un firmware más nuevo, mejorando por ejemplo el uso de la potencia. Funcionan con el Firmware del módulo ZB.

XBee PRO – Hay pocas diferencias entre un XBee regular y un XBee PRO. La diferencia en cuanto a hardware es que el XBee PRO es un poco más largo. Con respecto a comunicación, la versión Pro tiene un mayor alcance (1,6 Km línea vista), pero para ello tiene un mayor consumo de potencia.

Prestaciones	Dispositivo XBee	Dispositivo XBee Pro
Alcance en interiores	20 m	100 m
Alcance en exteriores	100 m	1500 m
Potencia de transmisión	1mW (0 dBm)	69 mW (18 dBm)
Velocidad de transmisión	250 kbps	250 kbps
Voltaje de alimentación	2.8 a 3.6 V	2.8 a 3.6 V
Frecuencia de operación	2.4 GHz	2.4 GHz

Tabla 2 Características de los módulos XBee y XBee Pro

2.2.3 I/O en módulos XBee

Tal como se muestra en la ilustración 3 todos los módulos XBee tienen un conjunto de pines configurables que pueden usarse para conectar sensores o actuadores. Con estos pines se puede recoger el dato de un sensor y mandarlo a otro módulo o encender una luz al estar conectado a un relé cuando recibe la señal sobre un pin configurado como salida. Los módulos XBee soportan entradas analógicas y digitales. Cada módulo posee 4 pines analógicos (ADC de 10 bits) y 10 pines digitales.

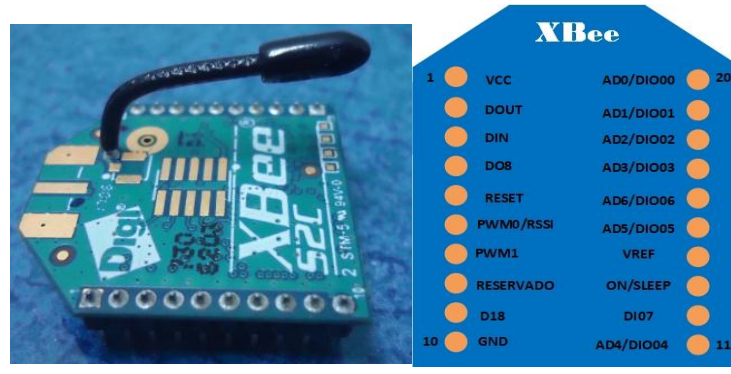


Ilustración 3. Pines I/O para módulos XBee

2.2.4 Direccionamiento.

Cada módulo XBee tiene una dirección única de 64 bits gravada de fábrica y aparecen en la parte trasera del módulo. La red ZigBee utiliza para sus algoritmos de ruteo direcciones de 16 bits. Una dirección de 16 bit puede ser asignada a cada módulo XBee y no es única. Si la dirección de 16 bits es FFFF se deshabilita la recepción de paquetes con direcciones de 16 bit. La dirección de 64 bits 000000000000FFFF está reservada para mandar un mensaje de broadcast. Cada vez que un dispositivo se asocia a una red ZigBee, el coordinador al cual se asocia le asigna una dirección única en toda la red de 16 bits. Por eso el número máximo teórico de elementos que puede haber en una red ZigBee es de $2^{16} = 65535$, que es el número máximo de direcciones de red que se pueden asignar.

2.2.5 Antenas, Señal y Rangos de Frecuencia

Cada módulo XBee cuenta con un tipo de antena característico, y debe seleccionarse de acuerdo a la aplicación a desarrollar. Los tipos de antena son:

- **Antena de cable (Whip Antenna):** Como su nombre lo indica es un cable que sobresale del XBee. En él la distancia máxima de transmisión es más o menos la misma en todas las direcciones.
- **Antena de chip:** La antena es un chip de cerámica plana que está al ras del cuerpo del XBee. Eso hace que sea más pequeño y robusto, sin embargo, la señal se atenúa en muchas direcciones. Se utilizan cuando existe el riesgo que la antena de cable se rompa o se tiene poco espacio para colocarlo.
- **Antena PCB:** La antena se imprime directamente en la placa de circuito del XBee. La antena

PCB ofrece la mayoría de las ventajas de la antena de chip con un costo menor.

- **UFL y conector RPSMA:** Necesitan una antena externa. Se utilizan cuando se desea orientar una antena en diversas posiciones o se requiere utilizar un tipo especial de antena.

La distancia de alcance de la señal de los módulos XBee está afectada por diversos factores:

Algunos materiales pueden reflejar las ondas de radio provocando interferencias. En particular materiales metálicos.

Las ondas de radio pueden ser absorbidas por objetos en su camino

Las antenas pueden ajustarse para incrementar la distancia.

La línea de visión puede ayudar a incrementar la fiabilidad de la señal.

2.2.6 Protocolos de comunicación por radio compatibles con XBee.

Los módulos XBee admiten múltiples protocolos inalámbricos que son adecuados para muchas topologías de red diferentes. Los estándares abiertos incluyen ZigBee, 802.15.4 y Wi-Fi. Digi también ha desarrollado protocolos propios como Multipoint y DigiMesh pero son privativos.

IEEE 802.15.4: Es un estándar que especifica la capa física y el control de acceso a los medios para redes inalámbricas de área personal de baja velocidad. Es la base de las especificaciones ZigBee la cual amplía aún más el estándar al desarrollar las capas superiores que no están definidas en IEEE 802.15.4. El estándar está diseñado específicamente para comunicaciones energéticamente eficientes en una configuración punto a punto o punto a multipunto e incluye modo sleep y seguridad.

ZigBee / ZigBee SE (Smart Energy): ZigBee es una especificación para un conjunto de protocolos de comunicación de alto nivel. Su objetivo principal es crear una topología de red en malla para permitir que una cantidad de dispositivos se comuniquen entre ellos. Se utiliza en sistemas grandes que necesitan expandirse sin pérdida de su función y que necesitan comunicaciones extendidas. El protocolo ZigBee tiene un rendimiento excelente en redes a gran escala con bajo consumo de energía en dispositivos finales.

DigiMesh (propiedad de Digi): DigiMesh es un protocolo patentado de redes inalámbricas punto a punto desarrollado por Digi International. DigiMesh forma una red de malla (Mesh). El protocolo permite la sincronización de nodos/routers en modo sleep y la operación con batería de

baja potencia. El protocolo es compatible con varios módulos de radio Digi de 900 MHz, 868 MHz, 865 MHz y 2.4 GHz. Se utiliza en sistemas que requieren una expansión de red simplificada y la capacidad de usar modo sleep en todos los nodos

El protocolo DigiMesh presenta excelentes prestaciones en sistemas en los que una mayor fiabilidad es importante debido a que los routers entran y salen debido a interferencias o daños.

El protocolo Multipunto es ideal para aplicaciones que requieren baja latencia y tiempos de comunicación predecibles. Ofrecen una comunicación rápida y sólida en configuraciones punto a punto y multipunto/estrella. Se utiliza cuando en redes multipunto con opciones de mayor alcance y en sistemas que no requieran comunicación rápida.

IEEE 802.11 (Wi-Fi): Los módulos XBee Wi-Fi brindan conectividad inalámbrica a dispositivos de punto final en redes 802.11 b/g/n. Al utilizar el conjunto de características 802.11, estos módulos son interoperables con otros dispositivos b/g/n 802.11, incluidos los dispositivos de otros proveedores. Es ideal para aplicaciones industriales que requieren un rápido tiempo de comercialización y permiten que los productos estén conectados a la nube.

2.2.7 Tipos de redes con XBee.

Los módulos XBee, pueden ser configurados para trabajar en redes de topología punto a punto, punto a multipunto, topología tipo árbol y redes tipo malla. Una característica muy destacable de los módulos es que automáticamente generarán la red entre ellos, sin intervención humana alguna, permitiendo la reparación de la red en caso de que algún nodo falle. Al mismo tiempo la red por sí sola resuelve la mejor ruta para un determinado paquete.

2.2.8 Comunicación inalámbrica y serie.

Los dispositivos XBee se comunican a través de ondas electromagnéticas. No pueden gestionar los datos enviados o recibidos, sin embargo, pueden comunicarse con otros dispositivos a través del interfaz serie. Los microcontroladores como el Atmega 328P pueden controlar los datos que envían los dispositivos XBee y gestionan los mensajes inalámbricos entrantes.

Existen dos tipos de comunicación en los dispositivos XBee:

- **Comunicación inalámbrica:** es la comunicación entre los módulos XBee a través de ondas electromagnéticas. Un módulo XBee solo recibirá y transmitirá datos a otros XBee dentro de

la misma red y usando el mismo canal.

- Comunicación serie: es la comunicación entre el módulo XBee y el microcontrolador o el PC a través de un puerto serie.

2.2.9 Modos de Operación.

Un módulo XBee es capaz de operar dentro de la red como un módulo independiente o conectado a un microcontrolador o PC. Cuando funciona como módulo independiente simplemente manda datos al nodo central de los dispositivos conectados a los puertos del módulo cuando está conectado a un microcontrolador o un PC, el módulo XBee usa la comunicación serie. En el caso del microcontrolador Atmega328P, éste envía datos al módulo XBee para que sean transmitidos de manera inalámbrica a otro microcontrolador. Los módulos XBee soportan dos modos de operación:

- Modo Transparente. La radio pasa la información tal cual la recibe por el puerto serie. Este modo tiene funcionalidades limitadas, pero es la forma más sencilla de comenzar.
- Modo API. En este caso un protocolo determina la forma en que los datos son intercambiados. Este modo permite hacer una red de comunicaciones más grande.

2.2.9.1 Modo Transparente

En modo transparente el módulo XBee transmite inmediatamente todo lo recibido por el puerto serie y todo lo recibido por radio se manda tal cual al puerto serie. En modo transparente para comunicar dos módulos, es necesario configurar la dirección del destino en el módulo que envía datos, tal como se muestra en la ilustración 4. Los módulos XBee pueden almacenar la dirección completa de 64 bits del módulo de destino. Esta dirección debe programarse en dos parámetros: Dirección de destino alta (DH) y Dirección de destino baja (DL). Por ejemplo, si se desea que los módulos A y B se comuniquen, se debe configurar la dirección de destino (DH + DL) de XBee A como la dirección MAC (SH + SL) de XBee B, y viceversa como se muestra en la ilustración 4.

El modo transparente tiene muchas limitaciones, por ejemplo, al trabajar con varios módulos es necesario configurar la dirección de destino antes de mandar un mensaje. Sin embargo, el modo transparente es perfecto cuando hay comunicación punto a punto entre solo dos elementos.

En modo transparente podemos usar el modo comando que es un estado en que los caracteres enviados al módulo XBee son interpretados como comandos en lugar de transmitirlos vía radio. Para cambiar a modo comando hay que mandar el string “+++”, cuando el módulo recibe un segundo de silencio seguido del string “+++” (sin /n o /r) y otro segundo de silencio, deja de mandar datos por radio y comienza a aceptar comandos locales. Al entrar en modo comando si transcurren 10 segundos sin recibir datos automáticamente sale de modo comando y vuelve a modo transparente. Para salir del modo configuración usar ATCN.

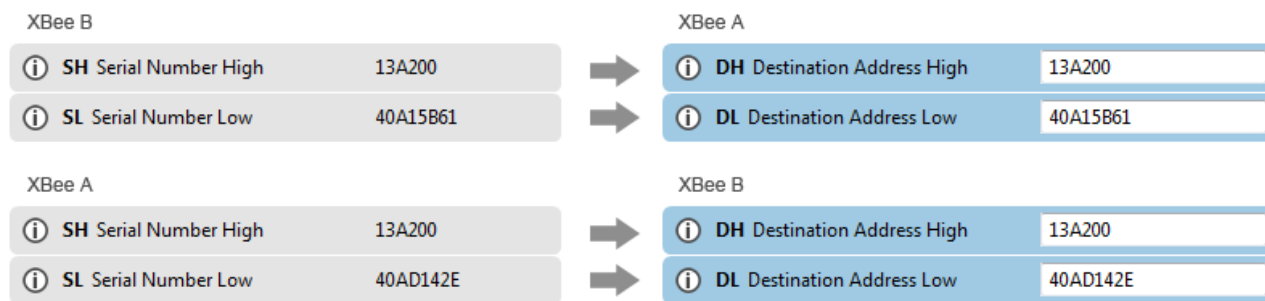


Ilustración 4. Configuración de dirección de destino

2.2.9.2 Modo comando

El propósito del modo comando es leer o escribir la configuración local del módulo XBee. Para ello se usan los comandos AT. En la ilustración 5 se observa que un comando AT comienza con las letras “AT” seguida de dos caracteres que identifican el comando a ejecutar y algunos otros parámetros opcionales. Por lo tanto, desde un ATmega328 sería muy sencillo configurar un módulo XBee en lugar de usar el interfaz gráfico XCTU. De hecho, la comunicación en modo transparente produce el mismo resultado que si los dos módulos estuvieran conectados por un cable, pero la comunicación inalámbrica hace innecesario ese cable físico.

El propósito del modo comando es leer o cambiar la configuración del dispositivo local XBee. Cada módulo tiene una serie de configuraciones, como el canal o la identificación de red, que definen su comportamiento. Estas configuraciones están identificadas por dos caracteres, por ejemplo, CH para el canal e ID para la identificación de la red. Cuando desee leer o establecer cualquier configuración del módulo XBee, debe enviarle un comando AT. Cada comando AT comienza con las letras "AT" seguidas por los dos caracteres que identifican el comando que se está emitiendo y luego por algunos valores de configuración opcionales.

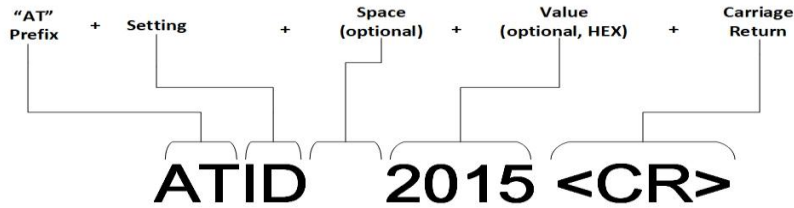


Ilustración 5. Estructura comando AT

Algunos comandos AT básicos:

- **AT:** Este comando verifica la conexión con el módulo. Esto es como preguntar "¿Estás ahí?" y el dispositivo respondiendo "Sí". Cuando se envía este comando, el módulo simplemente responde OK. Si no aparece un OK en respuesta, es probable que se haya agotado el tiempo de espera del modo de comando. Se debe enviar nuevamente el +++ para regresar al modo comando.
- **ATCN:** Este comando se utiliza para salir explícitamente del modo de comando, aunque si no escribe nada durante 10 segundos, el dispositivo saldrá automáticamente del modo Comando.
- **ATWR:** Este comando escribe la configuración actual en la memoria no volátil para que persista la próxima vez que se enciende el dispositivo. De lo contrario, los parámetros se restauran a los valores previamente guardados después de que el dispositivo se restablece.

Por ejemplo, para leer y establecer la configuración de ID de red, primero se introducen los caracteres "+++" para ingresar al modo comando, se recibe una respuesta "OK", es entonces cuando se introducen los comandos AT:

```
// Entrar a modo comando
+++OK
// Leer la configuración actual de ID de red:
ATID <Enter>
0
// Cambiar la configuracion de ID de red
ATID 2015 <Enter>
OK
```


2.2.9.2.1 Limitaciones del modo transparente.

Debido a este comportamiento, los dispositivos que funcionan en modo transparente tienen algunas limitaciones:

Para leer o escribir la configuración de un dispositivo en modo Transparente, primero debe hacer la transición del dispositivo al modo Comando. Si un dispositivo necesita transmitir mensajes a diferentes dispositivos, debe actualizar su configuración para establecer un nuevo destino. El dispositivo debe ingresar al modo Comando para configurar el destino.

Un dispositivo que funciona en modo transparente no puede identificar la fuente de un mensaje inalámbrico que recibe. Si necesita distinguir entre los datos que provienen de diferentes dispositivos, los dispositivos de envío deben incluir información adicional conocida por todos los dispositivos para que pueda extraerse más tarde. Para hacer esto, debe definir un protocolo sólido que incluya toda la información que crea que necesita en sus transmisiones.

2.2.9.3 Modo API

El modo llamado Interfaz de programación de aplicaciones (API) proporciona una interfaz estructurada donde los datos se comunican en paquetes organizados y en un orden determinado a través de la interfaz serial. Esto le permite establecer comunicaciones complejas entre dispositivos sin tener que definir su propio protocolo. La ilustración 6 presenta un ejemplo de comunicación en modo API entre dos módulos XBee.

Por defecto, los dispositivos XBee están configurados para funcionar en modo transparente: todos los datos recibidos a través de la entrada serial se ponen en cola para la transmisión de radio y los datos recibidos de forma inalámbrica se envían a la salida serial exactamente como se reciben, sin información adicional.

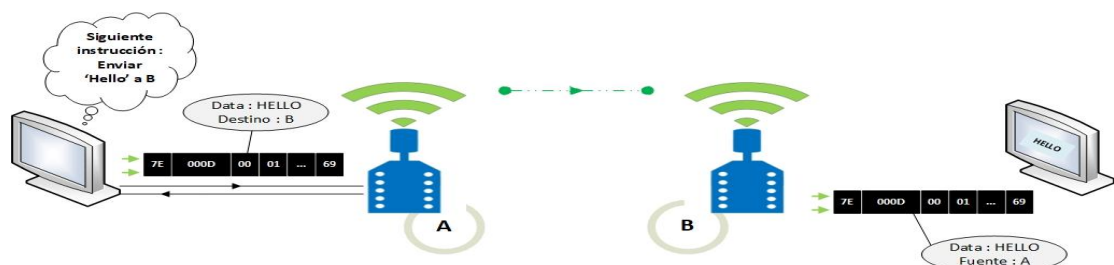


Ilustración 6. Comunicación en modo API

Fuente: Digi International Inc, 30 noviembre 2017, recuperado: <https://goo.gl/6hC2fV>

2.2.9.3.1 Ventajas del modo API

El modo API tiene las siguientes ventajas respecto al modo transparente en módulos XBee:

- Debido a que hay diferentes frames para diferentes propósitos (como configuración y comunicación), se puede configurar un dispositivo sin tener que ingresar al modo de comando.
- Dado que el destino de los datos se incluye como parte de la estructura de cuadros API, se puede usar el modo API para transmitir mensajes a múltiples dispositivos.
- La trama API incluye el origen del mensaje, por lo que es fácil identificar de dónde provienen los datos. Además, es posible la configuración local y remota de los dispositivos XBee en la red. Posibilita administrar la transmisión inalámbrica de datos a uno o varios destinos, así como el identificar la dirección de origen de cada paquete recibido.

2.2.9.3.2 Estructura de una trama API.

Los paquetes de datos estructurados en modo API se llaman tramas. Se envían y reciben a través de la interfaz serial del dispositivo y contienen el mensaje inalámbrico en sí mismo, así como información adicional, como el destino/fuente de los datos o la calidad de la señal.

Cuando un dispositivo está en modo API, todos los datos que entran y salen del módulo a través de la interfaz serial están contenidos en tramas que definen operaciones o eventos dentro del dispositivo. La ilustración 7 muestra las partes que componen una trama API.

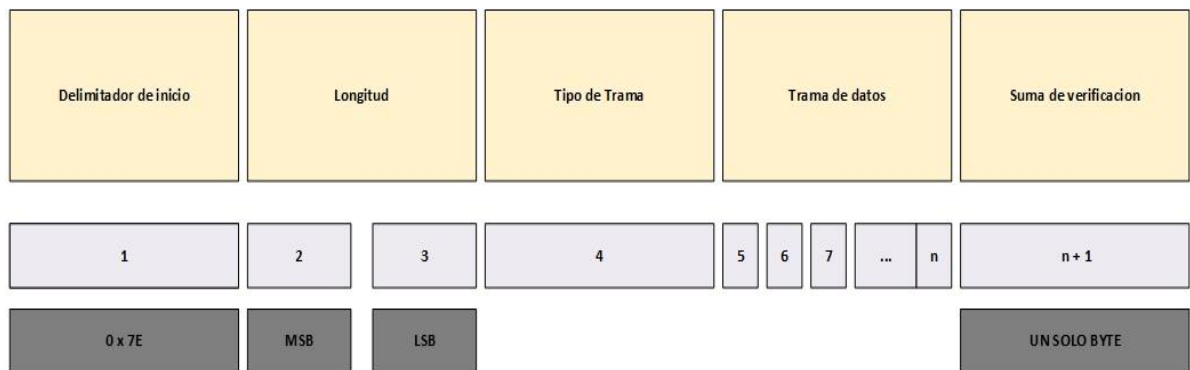


Ilustración 7. Estructura de una trama API.

Fuente: Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol 2009, pág 57 recuperado : <https://goo.gl/FEkvGg>

Cualquier dato recibido a través de la interfaz serial que se encuentre antes del delimitador de inicio es silenciosamente descartado por XBee. Si la trama no se recibe correctamente, o si la

suma de comprobación falla, los datos también se descartan y el módulo indica la naturaleza de la falla respondiendo con otra trama.

- **El delimitador de inicio** es el primer byte de un cuadro que consiste en una secuencia especial de bits que indican el comienzo de una trama de datos. Su valor es siempre 0x7E. Esto permite una detección fácil de una nueva trama entrante.
- **El campo de longitud** especifica el número total de bytes incluidos en el campo de datos de la trama. Su valor de dos bytes excluye al delimitador de inicio, la longitud y la suma de comprobación.
- **El tipo de trama (identificador API)** es el identificador de tipo de marco API. Determina el tipo de trama API e indica cómo se organiza la información en el campo Datos.

Identificador API	Tipo de mensaje
0x8A	Estado del modulo
0x08	Comando AT pero no remoto
0x09	Comando AT a cola
0x88	Respuesta a un comando AT, pero no remoto
0x00	Petición de transmisión (tomando de 64 bits)
0x01	Petición de transmisión (formato de 16 bits)
0x89	Estado de transmisión
0x80	Paquete recibido (dirección 64 bits)
0x81	Paquete recibido (dirección 16 bits)
0x10	Petición de transmisión al módulo local
0x11	Transmisión con direccionamiento explícito
0x97	Respuesta ante un comando remoto
0x17	Solicitud para ejecutar comando AT remoto
0x90	Trama de paquete recibido (respuesta)
0x8B	Estado de la transmisión al recibir respuesta

Tabla 3 Identificador de API

- **Trama de datos.** Este campo contiene la información recibida o que se transmitirá. Los datos de la trama están estructurados según el propósito de la trama API.
- **Suma de verificación (checksum).** Es el último byte de la trama y ayuda a probar la integridad de los datos. Se calcula tomando la suma hash de todos los bytes de la trama API que le precedieron, excluyendo los primeros tres bytes (delimitador y longitud de inicio). Las

tramas enviadas a través de la interfaz en serie con sumas de comprobación incorrectas nunca serán procesadas por el módulo y los datos serán ignorados. Sirve para detectar cambios accidentales en una secuencia de datos para proteger la integridad de estos, verificando que no haya discrepancias entre los valores obtenidos al hacer una comprobación inicial y otra final tras la transmisión. La idea es que se transmita el dato junto con su valor *hash*, de esta forma el receptor puede calcular dicho valor y compararlo así con el valor *hash* recibido. Si hay una discrepancia se pueden rechazar los datos o pedir una retransmisión.

2.2.9.3.3 Tipos de trama API.

El enlace inalámbrico requiere el uso de tres tipos de mensajes en particular: i) un mensaje para solicitar la transmisión de datos usando una dirección de destino de 16-bits, ii) un mensaje que indica la recepción de un paquete (usando direcciones de 16-bits) y, iii) un mensaje que indica el estado de un paquete transmitido. Los identificadores para estos mensajes son: 0x01, 0x81 y 0x89, respectivamente. Estos tres tipos de mensajes en forma de trama se explican a continuación.

1. Estructura de una trama para transmitir datos: está compuesta por diferentes campos, entre ellos se encuentra el identificador API, el identificador de Trama, la dirección de destino, un campo de opciones y uno de datos. En la figura 8 se muestra la estructura de este tipo de mensaje.

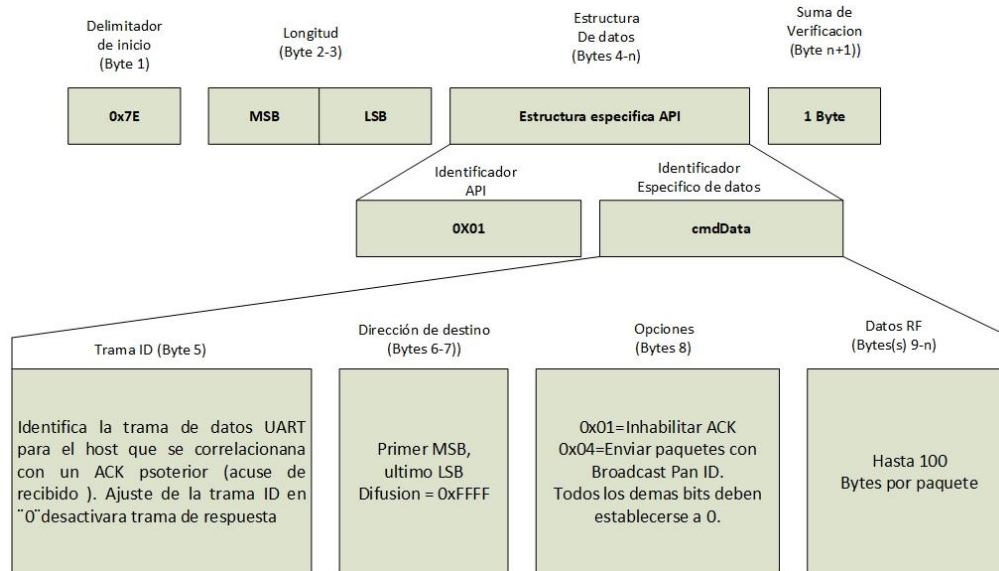


Ilustración 8. Estructura de una trama para transmitir datos

Fuente: Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol 23 septiembre 2009, pág 62 recuperado : <https://goo.gl/FEkvGg>

- **Identificador API:** este campo está conformado por un byte, el cual indica el tipo de mensaje. El identificador para una trama de solicitud de transmisión usando direcciones cortas de 16-bits correspondiente es el 0x01.
- **Identificador de Trama:** como su nombre lo indica, este campo permite reconocer a la trama, además permite relacionarla con su correspondiente acuse de recibo. Si el valor de este campo es 0, se deshabilita la trama que indica el estado de la trama enviada.
- **Dirección de destino:** este campo está formado por dos bytes, los cuales indican a quién está dirigida la trama. Primero se debe colocar el byte más significativo de la dirección y a continuación el menos significativo. Para enviar la trama a todas las unidades se debe utilizar la dirección 0xFFFF.
- **Opciones:** este campo está formado por un byte, y permite deshabilitar el acuse de recibo o enviar la trama a todas las PAN.
- **Datos:** este campo contiene la información que se desea enviar, puede tener hasta 100 bytes.

2. Estructura de la trama de recepción de un paquete: cuando un paquete es recibido por un módulo, lo envía a través de su puerto serial mediante la estructura indicada en la figura 9.

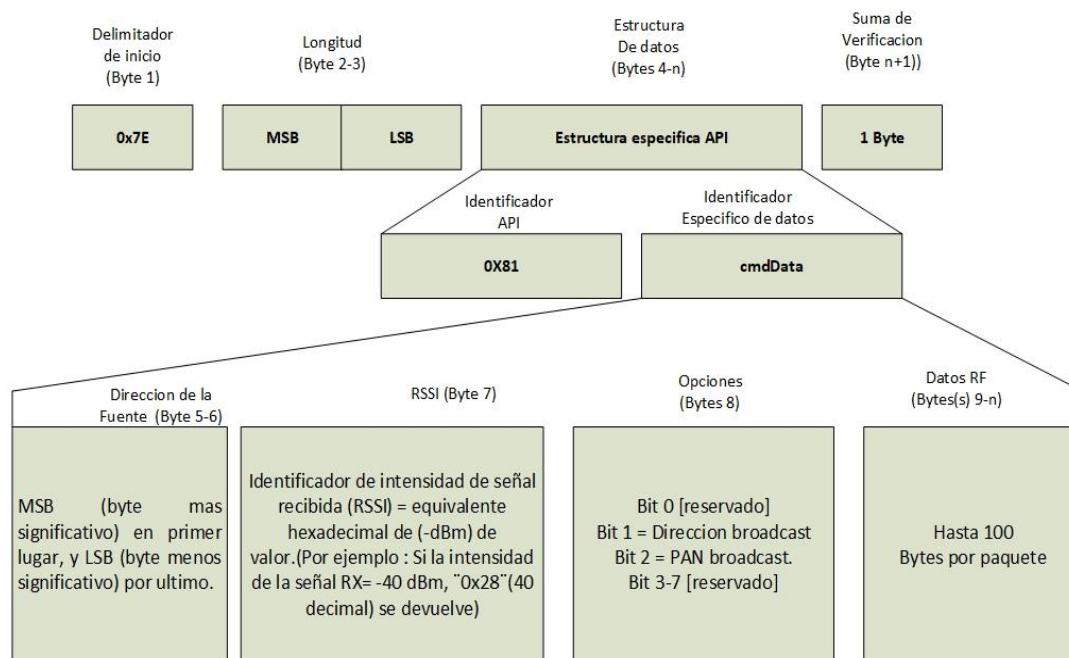


Ilustración 9. Estructura de una trama para recepción de datos
Fuente: (Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol 23 septiembre 2009 2009, pág 63
recuperado : <https://goo.gl/FEkvGg>)

Para este tipo de mensaje, el identificador API correspondiente es el 0x81 (recepción de un paquete usando dirección de 16-bits).

- **Dirección de origen:** este campo permite indicar a la unidad receptora quién le envió el paquete. Este campo está formado por dos bytes, el primero representa el byte más significativo de la dirección de 16-bits y el segundo el menos significativo.
- **El campo RSSI (Received Signal Strength Indicator):** este campo indica el nivel de potencia con que se recibieron los datos. Por ejemplo, si el valor de este campo es 0x25 (37 decimal), quiere decir que la potencia de la señal recibida es igual a -37dBm.
- **Opciones:** este campo le permite saber a la unidad receptora cómo fue direccionada la trama. Este campo está formado por un byte: el bit 1 indica si la trama fue enviada con una dirección de difusión (DH=0xFFFF) y el bit 2 indica si la trama fue enviada a todas las PAN1 (ID PAN=0xFFFF).
- **Datos:** este campo puede contener hasta 100 bytes, corresponde a los datos recibidos.

3. Estructura de una trama de estado de paquete: este mensaje se genera en respuesta a una solicitud de transmisión. En la figura 10 se muestra esta clase de mensaje, que indica si el paquete enviado fue transmitido exitosamente o si la transmisión falló. El identificador API de trama proporcionado a este tipo de mensaje es 0x89.

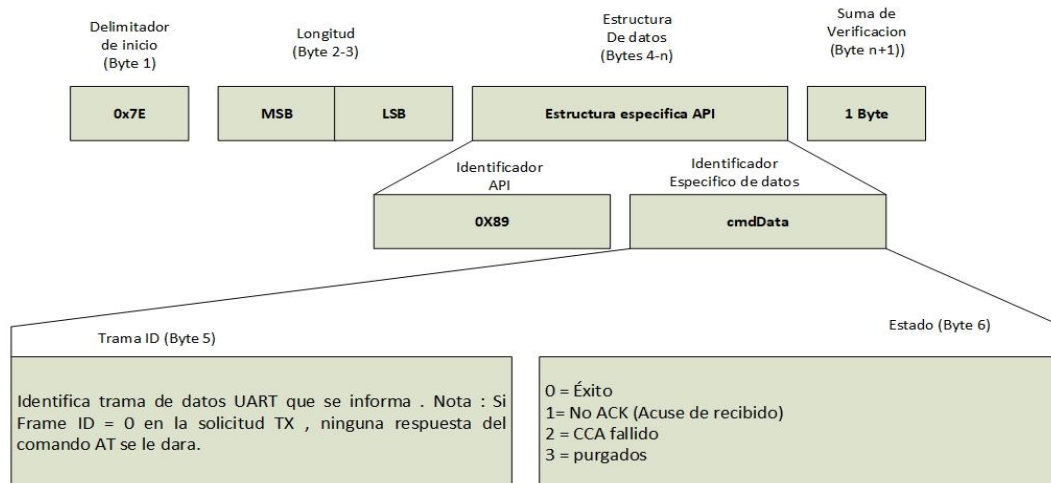


Ilustración 10. Estructura de una trama que indica el estado del paquete enviado
Fuente: (Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol 23 septiembre 2009 2009,pág 63
recuperado : <https://goo.gl/FEkvGg>)

- **Identificador de trama:** este campo está formado por un byte y permite indicar la trama que está siendo reportada. Si el campo de identificador de trama del paquete enviado es 0x00, no se genera este mensaje.
- **Estado:** este campo está formado por un byte e indica el estado de la trama enviada. Si el valor de este campo es 0x00, quiere decir que la transmisión se realizó exitosamente; un valor igual a 0x01 indica que el tiempo de espera para recibir el acuse de recibo expiró (no se recibió el ACK); un valor igual a 0x02 indica que el paquete no se envió porque no se dieron las condiciones adecuadas (el parámetro CA establece que la energía detectada en el canal debe ser superior a -44dBm para enviar un paquete), y por último, si el valor es igual a 0x03 quiere decir que el tiempo de espera para recibir una transmisión indirecta expiró.

2.2.10 Seguridad y cifrado

Los módulos XBee pueden ser configurados para comunicación segura mediante claves de cifrado. Los datos son cifrados antes de ser enviados y luego en el receptor son descifrados para poder usarlos. Activar la seguridad en una red XBee puede producir un ligero incremento en latencia y tamaño de los paquetes enviados. Para habilitar la comunicación segura se deben configurar los siguientes parámetros con el mismo valor en todos los dispositivos de la red:

EE = 1: AES Encryption Enable

KY: AES Encryption key que debe ser un string de 32 caracteres hexadecimales. Una vez configurado este valor es imposible recuperarlo.

El cifrado es de 128 bits AES.

2.2.11 Ahorro de energía

Los módulos XBee tienen capacidades de ahorro de energía. Los módulos se pueden poner en estado **sleep** y apenas consumir energía, pudiendo llegar a una duración de batería de varios años.

El protocolo 802.15.4 contiene cuatro conductas básicas para el modo **sleep** que se puede dividir en dos categorías: **pin-controlled sleep mode** y **cyclic sleep mode**. Por defectos el modo **sleep** está siempre deshabilitado. Los parámetros básicos para configurar en modo **sleep**: **SM** (Sleep Mode), **ST** (Time before sleep) y **SP** (Cyclic sleep period).

- **Modo pin-controlled sleep:** este modo es controlado por el Sleep_RQ (pin 9) de forma que cuando es puesto a HiGH (3.3 V) entra en modo sleep. (SM = 1)
- **Modo Cyclic Sleep mode:** el módulo se despierta y vuelve a modo sleep con una programación fija basada en el tiempo. Con SM = 4 se activa el modo. Con SM = 5 además de activar el modo cíclico, permite despertar el módulo a través del pin 9. En estos dos modos se debe configurar los parámetros ST y SP.

Los pines de los módulos relacionados con el modo sleep son el pin 9 que pone el módulo en modo sleep cuando está a HIGH (3.3V) y el pin 13 es una salida que se pone a HIGH cuando está despierto o a LOW cuando está como sleep, este pin se puede conectar a un led o a una entrada del microcontrolador. En la ilustración 11 se muestra la ubicación del pin 9 y pin 13.

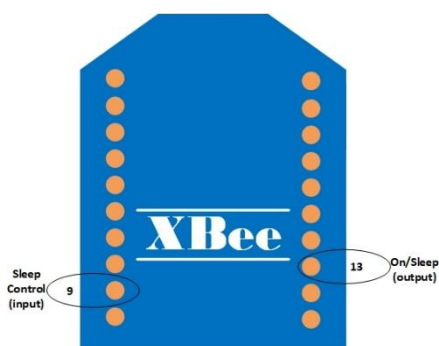


Ilustración 11. Pines de módulo Xbee para modo sleep
 Fuente: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/xbee/>

- **Time before sleep (ST)**

Define el período de inactividad del módulo (durante el cual no se envían o reciben datos) antes de volver a la suspensión cíclica. Si el XBee está transmitiendo o recibiendo un mensaje, no se dormirá. Esta configuración solo es aplicable si el modo sleep es 4 o 5.

- **Cyclic sleep period (SP)**

Define el período de tiempo que un XBee permanece dormido. Esta configuración solo es aplicable si el modo de suspensión es 4 o 5. Para la comunicación bidireccional con modos de suspensión, otros protocolos como ZigBee o DigiMesh pueden proporcionar una funcionalidad más apropiada.

2.2.12 XCTU

Para configurar y usar los módulos XBee es necesario descargar e instalar XBee Configuration and Test Utility (XCTU) que es un software multiplataforma que permite interactuar con los módulos mediante un interfaz gráfico. Tal como se muestra en la ilustración 12 la aplicación XCTU incluye la información de configuración de cada módulo XBee que sea conectado a la computadora para ser probada la comunicación con otros módulos.

XCTU nos sirve para configurar, inicializar, actualizar firmware y testear los módulos XBee, comunicándose por puerto serie a los módulos. Una ventaja de este software es que puedes ver rápidamente un resumen de todos los parámetros del módulo y una descripción de ellos.



Ilustración 12. Módulos XBee en XCTU

Para configurar un módulo XBee con el XCTU, lo primero es poner el modo configuración y descubrir los módulos, seleccionando el puerto COM del USB al que he conectado la placa de desarrollo. El software posibilita escanear y obtener configuraciones de módulos de manera remota para lo cual es necesario configurar los parámetros DH y DL de la MAC del módulo remoto. A continuación, se describe el significado de cada parámetro a configurar.

- **Parámetro CH (Operating Channel):** Es el canal que será utilizado para transmitir o recibir datos entre los módulos.
- **Parámetro ID:** Permite identificar a una Red de Área Personal en particular. Para enviar un mensaje a todas las Redes de Área Personal el valor de ID debe ser 0xFFFF. El rango es de 0 a 0xFFFF.
- **Parámetro DH (Destination Address High):** Corresponde a los últimos 32 bits (más significativos) de los 64 bits correspondientes a la dirección de destino. Este valor, en conjunto con el parámetro DL, forma la dirección de destino usada para la transmisión. El rango es de 0 a 0xFFFFFFFF. Para transmitir utilizando direcciones de 16 bits, el valor de DH debe ser cero, y el valor de DL debe ser inferior a 0xFFFF. Es importante recordar que en la mayoría de los módulos XBee el parámetro DH es el mismo.
- **Parámetro DL (Destination Address Low):** Corresponde a los primeros 32 bits (menos significativos) de los 64 bits que forman la dirección de destino. El valor de DL, en conjunto con el valor de DH, define la dirección de destino. El rango es de 0 a 0xFFFFFFFF. Para emplear direcciones de 16 bits, el valor de DH debe ser 0 y el valor de DL debe ser menor a 0xFFFF.
- **Parámetro MY (16-bit Source Address):** Define una dirección de origen de 16 bits. El rango es de 0 a 0xFFFF. Para deshabilitar la dirección de 16 bits y habilitar la dirección de 64 bits, se debe poner MY=0xFFFF. La dirección de origen de 64 bits siempre está habilitada.
- **Parámetro SH (Serial Number High):** admite leer los 32 bits más significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen. La dirección de origen es un número único, asignado por el IEEE para cada módulo de RF.
- **Parámetro SL (Serial Number Low):** permite leer los 32 bits menos significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen. La dirección de origen es establecida por el IEEE, como un número único para cada módulo.
- **Parámetro SC (Scan Channels):** Este parámetro define la lista de los canales que son examinados para determinar si están activos y el nivel de energía detectada. El valor por defecto 0xFFFF es para examinar todos los canales.
- **Parámetro SD (Scan Duration):** establece el tiempo para inspeccionar el canal.

Capítulo 3

3.1 Instrumentación

Se define instrumentación como el mecanismo que se utiliza para reunir información de algún proceso, esto implica que un instrumento este compuesto de varias partes, entre ellas: un sensor y un mecanismo de grabación digital o análoga. A continuación, se describe el equipo utilizado en este trabajo para la implementación de un sistema inalámbrico para el monitoreo continuo de vibraciones.

En el área de vibraciones de estructuras, dinámica estructural, es usual medir aceleraciones, las cuales están relacionadas directamente con las fuerzas inerciales en las estructuras.

3.1.1 Acelerómetros 9DOF MPU (Motion Process Unit)

En los últimos años se ha visto una revolución en la tecnología de detección de movimiento inercial (Unidades de movimiento inercial o IMU).

Uno de los MPU más conocidos es el MPU-6050, el cual, consiste en un acelerómetro y giroscopio MEMS (sistema micro electromecánico) con convertidores analógico a digital de 16 bits, lo cual significa que divide el rango dinámico en 65536 fracciones, estos aplican para cada eje X, Y y Z al igual que en la velocidad angular, ofrece una precisión de 60 micro-g y 0.01 grados/segundo, respectivamente. El dispositivo se lanzó por primera vez a finales de 2010. El MPU6050 se rediseñó recientemente para convertirse en el giroscopio/acelerómetro MPU6500, se redujo el tamaño en un 40% y se está utilizando en el nuevo sensor de 9 ejes MPU9250. El MPU-6050 tiene una innovación notable llamada Digital Motion Processor (DMP) integrado en el chip. Permite que el DMP realice cálculos a partir de los datos del sensor (acelerómetro y giroscopio) de 6 ejes a una velocidad fija de 200 Hz y los resultados se entregan al microcontrolador host. Sin embargo, incluso con los algoritmos mejorados en el DMP, todavía hay deriva en los datos del giroscopio, ya que, no se tiene un vector de referencia ortogonal absoluto como en el caso del acelerómetro, el cual es la gravedad. Sin embargo, se puede agregar un segundo vector de referencia ortogonal; el magnetómetro.

Los magnetómetros son típicamente sensores de efecto Hall que ofrecen mediciones de campo magnético de tres ejes con alta precisión y exactitud, por ejemplo, el HMC5883L de Honeywell logra una resolución de ± 2 miliGauss para un rango completo de ± 8 Gauss.

Error en las medidas. Las IMU's son unos artefactos que con un poco de trigonometría pueden dar un ángulo con total exactitud. Pero hay dos problemas muy importantes: el ruido y los errores. El ruido son todas aquellas interferencias que afectan a los dispositivos electrónicos. El acelerómetro es capaz de medir cualquier ángulo, sin embargo, sus lecturas son ruidosas y tienen un cierto margen de error.

3.1.2 IMU MPU-9250 de 9 grados de libertad

Internamente, el sensor MPU-9250 presentado en la ilustración 13, incorpora en un mismo integrado una unidad de medición inercial MPU-6500, que a su vez está formado por acelerómetro de 3DOF y un giroscopio de 3DOF, y un magnetómetro AK8963 de 3DOF, por tal razón el sensor MPU-9250 es de 9 grados de libertad.

La comunicación en ambos modelos puede realizarse tanto por bus SPI como por bus I2C, por lo que es sencillo obtener los datos medidos. La tensión de alimentación es de bajo voltaje entre 2.4 a 3.6V pero en la mayoría de los módulos incluye un regulador de voltaje que permite alimentar directamente a 5V.

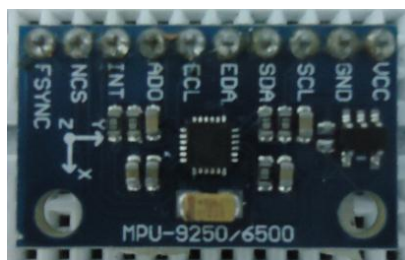


Ilustración 13. Dispositivo MPU-9250

Es un sensor consume 3.5mA, con todos los sensores y el DMP activados. Dispone de un sensor de temperatura embebido, un reloj de alta precisión e interrupciones programables. También puede conectarse con otros dispositivos I2C.

Dispone de convertidores analógicos digitales (ADC) de 16bits. El rango del acelerómetro puede ser ajustado a $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, y $\pm 16g$, el del giroscopio a ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$, y el del magnetómetro hasta $\pm 4800\mu\text{T}$.

El MPU-9250 incorpora un procesador interno (DMP Digital Motion Processor) que ejecuta complejos algoritmos de MotionFusion para combinar las mediciones de los sensores internos,

evitando tener que realizar los filtros de forma exterior.

El MPU-9250 es un IMU de nueva generación, que proporciona resultados superiores a otros IMUs como el MPU-6050. Al incorporar un magnetómetro, el MPU-9250 elimina la deriva (drift) que puede aparecer en otros IMUs al cabo de unas horas de uso.

Además, frente a otros IMUs de 9DOF dispone la ventaja de disponer de los tres sensores (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro) en el mismo integrado, por lo que su DMP puede realizar cálculos y correcciones con las mediciones de los tres sensores de forma simultánea.

En los restantes IMUs de 9DOF estos cálculos deben realizarse de forma externa, lo que supone una pérdida de precisión y rendimiento. (*Ingeniería, informática y diseño, 2018, recuperado: <https://goo.gl/KSbJEY>*)

3.2 Protocolos de Comunicación.

3.2.1 Protocolo I2C

El estándar I2C (Inter-Integrated Circuit) fue desarrollado por Philips en 1982 para la comunicación interna de dispositivos electrónicos en sus artículos. I2C es un bus de comunicaciones en serie. Su nombre viene de Inter-Integrated Circuit (Inter-Circuitos Integrados). La velocidad es de 100 kbit/s en el modo estándar, aunque también permite velocidades de 3.4 Mbit/s. Es un bus muy usado en la industria, principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados (Embedded Systems) y generalizando más para comunicar circuitos integrados entre si que normalmente residen en un mismo circuito impreso.

Cuando los datos son enviados por SDA, los pulsos de reloj son enviados por SCL para mantener el maestro y el esclavo sincronizados. La frecuencia del reloj estándar originalmente se puso a 100 KHz. En posteriores actualizaciones, se introdujo una fast speed de 400 KHz y una high speed de 1.7 a 3.4 MHz. El microcontrolador ATmega328 puede soportar la velocidad estándar y fast speed, BeagleBoard tiene tres buses I2C cada uno a una velocidad distinta y tanto BeagleBoard como Raspberry Pi soportan velocidad estándar y fast speed. Fast speed corresponde a una velocidad de transferencia de 50Kbytes/sec lo que puede ser una velocidad muy baja para algunas aplicaciones de control. (*Aprendiendo Arduino, 07 de septiembre 2017 , recuperado: <https://goo.gl/YrVvai>*)

3.2.2 Protocolo SPI

El bus SPI (Serial Peripheral Interface) fue desarrollado por Motorola en 1980. Sus ventajas respecto a otros sistemas han hecho que se convierta en un estándar de facto en el mundo de la electrónica y automatización. El bus SPI tiene una arquitectura de tipo maestro-esclavo. El dispositivo maestro (master) puede iniciar la comunicación con uno o varios dispositivos esclavos (slave), y enviar o recibir datos de ellos. Los dispositivos esclavos no pueden iniciar la comunicación, ni intercambiar datos entre ellos directamente.

En el bus SPI la comunicación de datos entre maestros y esclavo se realiza en dos líneas independientes, una del maestro a los esclavos, y otra de los esclavos al maestro. Por tanto la comunicación es Full Duplex, es decir, el maestro puede enviar y recibir datos simultáneamente.

Otra característica de SPI es que es bus síncrono. El dispositivo maestro proporciona una señal de reloj, que mantiene a todos los dispositivos sincronizados. Esto reduce la complejidad del sistema frente a los sistemas asíncronos.

Entre sus ventajas se encuentra la alta velocidad de transmisión (hasta 8 Mhz en ATmega328) y Full Duplex, además los dispositivos necesarios son sencillos y baratos, lo que hace que esté integrado en muchos dispositivos y puede mandar secuencias de bit de cualquier tamaño, sin dividir y sin interrupciones. En cuanto a sus desventajas se tiene que requiere 3 cables (SCK, MOSI y MISO) + 1 cable adicional (SS) por cada dispositivo esclavo y no dispone de ningún mecanismo de control, es decir, no se puede saber si el mensaje ha sido recibido y menos si ha sido recibido correctamente. Solo es adecuado en distancias cortas (unos 30cm). *(Ingeniería, informática y diseño, 14 de mayo 2016, recuperado: <https://goo.gl/PVD3ER>)*

3.3 Raspberry Pi

3.3.1 Descripción de Raspberry Pi

Raspberry Pi es un ordenador de placa simple o SBC (Single Board Computer) por sus siglas en inglés, se trata de una placa de bajo coste y de tamaño reducido, desarrollado por la fundación Raspberry Pi en el reino unido, teniendo como objetivo principal estimular la enseñanza de informática en las escuelas. *(Raspberry Pi, En Wikipedia. recuperado el 01 de septiembre de 2018 de: https://es.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi).*

3.3.2 Especificaciones técnicas

El dispositivo de Raspberry Pi se encuentra por el momento disponible en dos modelos, conocidos únicamente como modelo A y modelo B, el modelo B posee algunas variantes en cuanto a la tecnología usada. Para este trabajo de graduación se utiliza una placa Raspberry Pi 3 modelo B + mostrada en la ilustración 14.



Ilustración 14. Raspberry Pi 3 modelo B+

Raspberry Pi 3 Modelo B+	
SoC:	Broadcom BCM2837 (CPU + GPU + DSP + SDRAM + Puerto USB)
CPU:	1.4GHz 64-bit quad-core ARMv8
Instrucciones:	RISC de 64 bits
GPU:	Broadcom VideoCore IV, 1080p30 H.264/MPEG-4 AVC3
Memoria (SDRAM):	1 GB (compartidos con la GPU)
Puertos USB2.0:	4
Entradas de vídeo:	Conector MIPI CSI que permite instalar un módulo de cámara
Salidas de vídeo:	Conector HDMI, Interfaz DSI para panel LCD
Salidas de audio:	Conector de 3.5 mm, HDMI
Almacenamiento:	MicroSD
Conectividad de red:	10/100/1000 Ethernet (RJ-45), Wifi 802.11n/ac, Bluetooth 4.2 BLE.
Periféricos de bajo nivel:	17 x GPIO y un bus HAT ID
Reloj en tiempo real:	Ninguno
Fuente de alimentación:	5 V vía Micro USB o GPIO header
Sistemas operativos:	Raspbian, Pidora, Arch Linux ARM, SUSE Linux Enterprise Server
Dimensiones:	85.60mm × 53.98mm

Tabla 4 Tabla de especificaciones Raspberry Pi 3 modelo B+

3.3.3 GPIO

La ilustración 15 muestra los pines de entrada/salida de Propósito General, consta de 20 pares de pines machos (header), etiquetados como 'J8' colocados en fila se encuentra ubicado en la parte superior del dispositivo. Los pines del GPIO se pueden designar como entrada o salida en la programación, es decir no tienen ningún propósito especial definido.

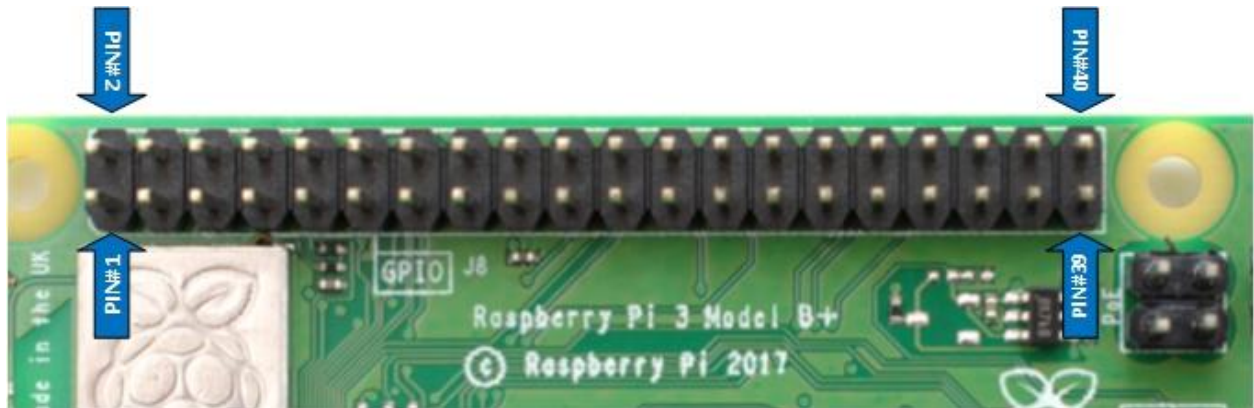


Ilustración 15. Numeración de GPIO en Raspberry Pi 3 Modelo B+

Fuente: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/GPO>

3.4 Pantalla táctil

El sistema electrónico para monitoreo de vibraciones cuenta con una pantalla táctil de 3.5 pulgadas de 320 x 480 pixeles mostrada en la figura 16, que le permite al usuario solicitar y visualizar los datos de manera manual a cada uno de los 4 nodos instalados en el edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. También permite mostrar los reportes y gráficos generados. Además es posible la interrogar de manera individual a cada nodo para constatar el estado activo de éstos. Se han añadido los controladores de la pantalla al kernel para que sea manejada por el sistema operativo Rasbian Jessie.



Ilustración 16. Pantalla táctil TFT 3.5" de 320x480 pixeles para Raspberry Pi

3.5 Microcontrolador ATmega328P

3.5.1 Descripción del microcontrolador ATmega328P

Se trata de un microcontrolador CMOS de 8-bit de bajo consumo basado en la arquitectura del microcontrolador RISC, pertenece a la serie megaAVR, creado por las industrias Atmel. Con 32 registros de trabajo de propósito general, todos ellos conectados directamente a su ALU (unidad de lógica aritmética) permite que dos registros que son independientes puedan acceder a una sola instrucción que se ha ejecutado en un ciclo de reloj, logrando con esto un mayor rendimiento comparados con microcontroladores convencionales, alcanzando rendimientos cercanos a 1 millos de instrucciones por segundo (MIPS). (Atmel Corporation, ATmega328/P Datasheet complete, recuperado de: <https://goo.gl/AZbxQb>, pág:1:)

3.5.2 Especificaciones técnicas

Posee características como: 32 KB de memoria flash; con la capacidad de leer-mientras-escribe, 1 KB de memoria EEPROM, 2 KB de SRAM, 23 líneas de E/S de propósito general, 32 registros de proceso general, programador de modo USART , protocolo I2C, 6 canales 10-bit Conversor A/D. (Atmel Corporation, ATmega328/P Datasheet complete, recuperado de: <https://goo.gl/AZbxQb>, pág:9)

Características técnicas Atmega328P	
Flash	32 Kbytes
SRAM	2 Kbytes
Cantidad Pines	28
CPU	8-bit AVIR
Pines máximos de E/S	23
Resolución de ADC	10
EEPROM	1K
Canales PWM	6
Voltaje de operación	1.8v-5.5v
Flash	32 Kbytes

Tabla 5 Resumen de parámetros técnicos del microcontrolador Atmega328P.

3.6 Almacenamiento de datos.

3.6.1 Google Drive.

Google Drive es junto a Dropbox y OneDrive el sistema de almacenamiento en la nube más popular del mundo. Es multiplataforma, por lo que cuenta con versión móvil y de escritorio, aunque su funcionamiento varía según el sistema desde el cual el cliente se conecta. Los desarrolladores independientes han creado un cliente de escritorio para Google Drive que funciona perfectamente en Linux, aunque es de pago, Insync. De forma frecuente aparecen clientes no oficiales gratuitos, aunque van cerrando al poco tiempo.

Hay muchas alternativas para sincronizar archivos con la nube de Drive directamente desde Linux. Ninguna es perfecta y las que proporcionan más opciones son de pago, como es el caso de Insync. Se trata de un cliente que se puede descargar e instalar y que presta la misma función que el oficial creado por Google

3.6.2 InSync.

Insync es una aplicación de pago. El software que ofrece Insync permite sincronizar todo el contenido de Google Drive del usuario con su disco duro en el PC, trabajando de igual manera que la aplicación existente de Google Drive para Windows. Insync es multiplataforma, estando disponible para Linux, Mac, Windows, Windows Phone, Android y iPhone.

Para la investigación de este trabajo de graduación, la instalación de los sistemas electrónicos en el edificio, así como la adquisición de vibraciones tuvo la duración de un mes, razón por la cual no se optó por la compra de la versión de pago de la aplicación con un costo de \$30, únicamente se realizaron tres pruebas de vinculación de un directorio de la Raspberry Pi con Google Drive las cuales resultaron exitosas.

InSync es un cliente de sincronización y copia de seguridad de la interfaz gráfica de usuario de Google Drive con características de sincronización inteligente y compatibilidad de archivos. Se puede utilizar a través de la línea de comandos en Linux, en Windows Server, e incluso en el Raspberry Pi.

Ventajas:

- Es automático: cuando detecta cambios (en la nube o en local), se encarga de mantener todos los ficheros sincronizados.

- Funciona con línea de comando: La placa Raspberry Pi tiene es capaz, de manera autónoma, de subir y modificar ficheros a través de cualquier script.
- Múltiples cuentas en un sólo dispositivo.
- Convierte Documentos de Google Documents a documentos Office y OpenDocument (OpenOffice y LibreOffice).
- Sincronización selectiva. Compartir fotos y archivos a través de enlaces.

3.7 Python

Python es considerado un lenguaje de alto nivel diseñado principalmente para ser fácil de implementar y comprender. Es de código abierto, por lo tanto, su uso es gratuito, incluso para aplicaciones comerciales. Puede ejecutarse en dispositivos con sistemas operativos como Mac, Windows y Unix e incluso ha sido portado a máquinas virtuales JAVA y .NET.

Se considera como un lenguaje de scripting, usado a menudo para la creación de aplicaciones web y web dinámico. Una de sus ventajas es su compatibilidad con varios programas de imágenes 2D y 3D permitiendo así a los usuarios la creación de complementos y extensiones personalizadas.

Los scripts escritos en Python, archivos con extensión .PY pueden ser analizados y ejecutados inmediatamente.

La biblioteca de librerías de Python es extensa y se encuentra a libre disposición en forma binaria y de código fuente para todas las plataformas soportadas.

3.7.1 Librerías utilizadas de Python

3.7.1.1 XLWT

XLWT es una librería para generar spreadsheet compatibles con MS Excel 97/2000/XP/2003 XLS de igual manera permite la escritura de datos y la forma en cómo se presenta.

Módulos utilizados:

- xlwt.Style
- xlwt.Workbook
- xlwt.Worksheet
- xlwt.write

- `xlwt.add_sheet`
- `xlwt.save`

3.7.1.2 XLRD

XLRD es una librería que permite la lectura y la forma en cómo se presenta datos de archivos spreadsheet compatibles con MS Excel 97/2000/XP/2003 XLS

Módulo utilizado:

- `xlrd.open_workbook`

3.7.1.3 XLUTILS

Esta librería proporciona una colección de utilidades para trabajar con spreadsheet compatibles con MS Excel 97/2000/XP/2003 XLS, estas utilidades requieren los módulos de XLRD y de XLWT para su funcionamiento.

Módulos utilizados:

- `xlutils.copy.copy()`

3.7.1.4 NUMPY

Numpy es una librería utilizada para procesos científicos-matemáticos con PYTHON, adecuado para el manejo de objetos de matrices de N-dimensiones, herramientas para la incorporación de código C/C++ y Fortran, algebra lineal, transformada de Fourier entre otros.

Módulos utilizados:

- `Numpy.zeros`
- `Numpy.argmax`

3.7.1.5 MATPLOTLIB

Es una librería que permite generación de gráficos a partir de datos contenidos en listas y/o arreglos, Numpy se puede considerar como una extensión Matplotlib.

Módulos utilizados:

- `Matplotlib.pyplot`
- `Matplotlib.plot`

- Matplotlib.savefig
- Matplotlib.clf
- Matplotlib.subplot
- Matplotlib.grid
- Matplotlib.xlabel
- Matplotlib.ylabel
- Matplotlib.legend
- Matplotlib.scatter
- Matplotlib.annotate
- Matplotlib.ylim
- Matplotlib.title

3.7.1.6 TIME

Time es una librería que proporciona varias funciones relacionadas con el tiempo, esta librería por defecto siempre se encuentra disponible, sin embargo no todos los módulos lo están.

Módulos utilizados:

- Time.strftime

3.7.1.7 OS

Esta librería proporciona funcionalidades dependientes del sistema operativo, permite el manejo de archivos y la manipulación de rutas.

Módulos utilizados:

- Os.chmod
- Os.path.join
- Os.path.isdir
- Os.chdir
- Os.makedirs
- Os.chmod
- Os.mkdir
- Os.getcwd

3.7.1.8 REPORTLAB

Reportlab es una librería de código abierto por lo tanto es gratis, que permite la creación de documentos PDF que pueden ser complejos, basado en datos y gráficos vectoriales personalizados

Módulos utilizados:

- Reportlab.pdfgen.canvas
- Reportlab.lib.colors
- Reportlab.graphics.shapes.Drawing
- Reportlab.lib.pagesizes.A4

3.7.1.9 STRING

Es una librería que contiene constantes, clases y métodos que permiten el manejo de cadenas.

Módulos utilizados:

- String.split
- String.strip

3.7.1.10 PYSERIAL

Es una librería que permite el acceso al puerto serial, para la transmisión y recepción de datos. Aunque se debe importar con el nombre de 'serial' se debe de instalar como pyserial.

Módulos utilizados:

- Serial.Serial
- Serial.readline

3.7.1.11 SUBPROCESS

Este módulo permite trabajar de forma directa con procesos del sistema operativo, permitiendo obtener los resultados obtenidos por entrada/salida/error pudiendo almacenar esta información en variables.

3.7.1.12 CRONTAB

El módulo de Crontab permite la lectura y escritura de los archivos o trabajos cron, permitiendo la manipulación del archivo crontab y de esta manera la automatización de procesos.

3.7.1.13 SYS

El módulo SYS provee accesos a variables y funciones que interactúan con el intérprete.

3.7.1.14 TKINTER

El módulo de Tkinter es la interfaz estándar de Python para la creación de GUI (interfaz gráfica), está formado por un kit de herramientas que consiste en una serie de módulos para la creación y manipulación de widgets u objetos que conforman la interfaz gráfica.

Widgets utilizados:

- Button y Entry
- Frame, Label y Message
- Progressbar
- Menu

3.8 Módulo microSD

En la ilustración 17 se observa el módulo microSD que permite conectar a un microcontrolador una tarjeta de memoria microSD para almacenar grandes cantidades de datos. Este módulo está diseñado para acceder a la memoria MicroSD en modo SPI. Tiene integrado un regulador de tensión para alimentar con 5 y 3.3 V.

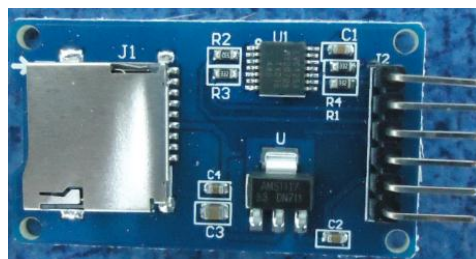


Ilustración 17. Módulo microSD

3.9 Módulo RTC

El módulo RTC (Real Time Clock) mostrado en la ilustración 18 es capaz de entrega fecha y hora de muy buena exactitud ya que está basado en el chip DS3231 y contiene una memoria EEPROM para almacenar información. Si bien los microcontroladores poseen contadores internos, estos no son tan exactos como un RTC dedicado. La principal diferencia con el DS1307; es el oscilador interno compensado por temperatura, lo que hace que su precisión sea muy alta. La memoria EEPROM permite almacenar 4K Bytes de datos de manera permanente. Cuenta con compensación de año bisiesto y una exactitud de reloj de 2ppm. Proporciona la fecha con segundos, minutos, horas, numero día, día de la semana, mes y año.



Ilustración 18. Módulo RTC DS3231

3.10 Diseño PCB

El PCB del sistema electrónico se muestra en la ilustración 19 y permite la comunicación de todos sus elementos siendo montados cada uno de ellos en headers específicos para cada dispositivo.

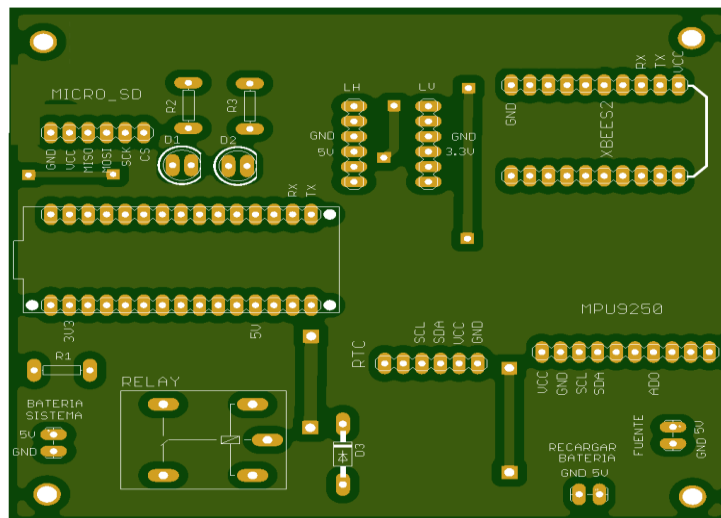


Ilustración 19. PCB lado de componentes del sistema electrónico

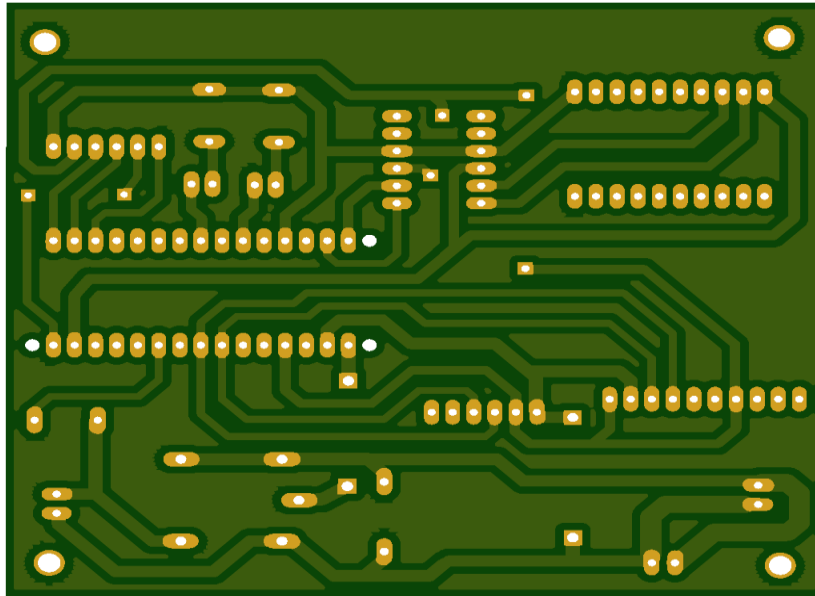


Ilustración 20. PCB lado de pistas del sistema electrónico

El PCB dispone de headers para conectar y comunicar los siguientes elementos: un módulo microSD donde se almacenan temporalmente las aceleraciones y velocidades angulares en los tres ejes ortogonales identificados con hora, minuto y segundo en que se realizó la captura de datos del sensor, un módulo RTC DS3231 que proporciona la fecha y hora real previamente configurada, un sensor MPU9250 del que se obtienen los valores de aceleración y velocidad angular del eje X, Y y Z al presentarse una vibración en la estructura del edificio donde ha sido instalado y finalmente un módulo de radiofrecuencia XBee S2C necesario para enviar de manera inalámbrica los datos almacenados en la microSD a un nodo central utilizando el protocolo ZigBee y un microcontrolador Atmega328P que contiene y ejecuta el algoritmo necesario para que el sistema electrónico diseñado cumpla su función de adquirir y enviar remotamente las vibraciones del edificio.

La placa PCB cuenta con dos entradas para energizar el sistema con 5 voltios, una ellas conecta a un módulo que dispone de una batería 18650 cuya función es servir como respaldo de suministro eléctrico en caso exista un corte de energía en el edificio donde fue instalado.

3.11 Diagrama de bloques

El diagrama de bloques del sistema electrónico diseñado se presenta en la ilustración 21 y muestra de forma simplificada el funcionamiento general. Cada uno de los nodos es representado por bloques.

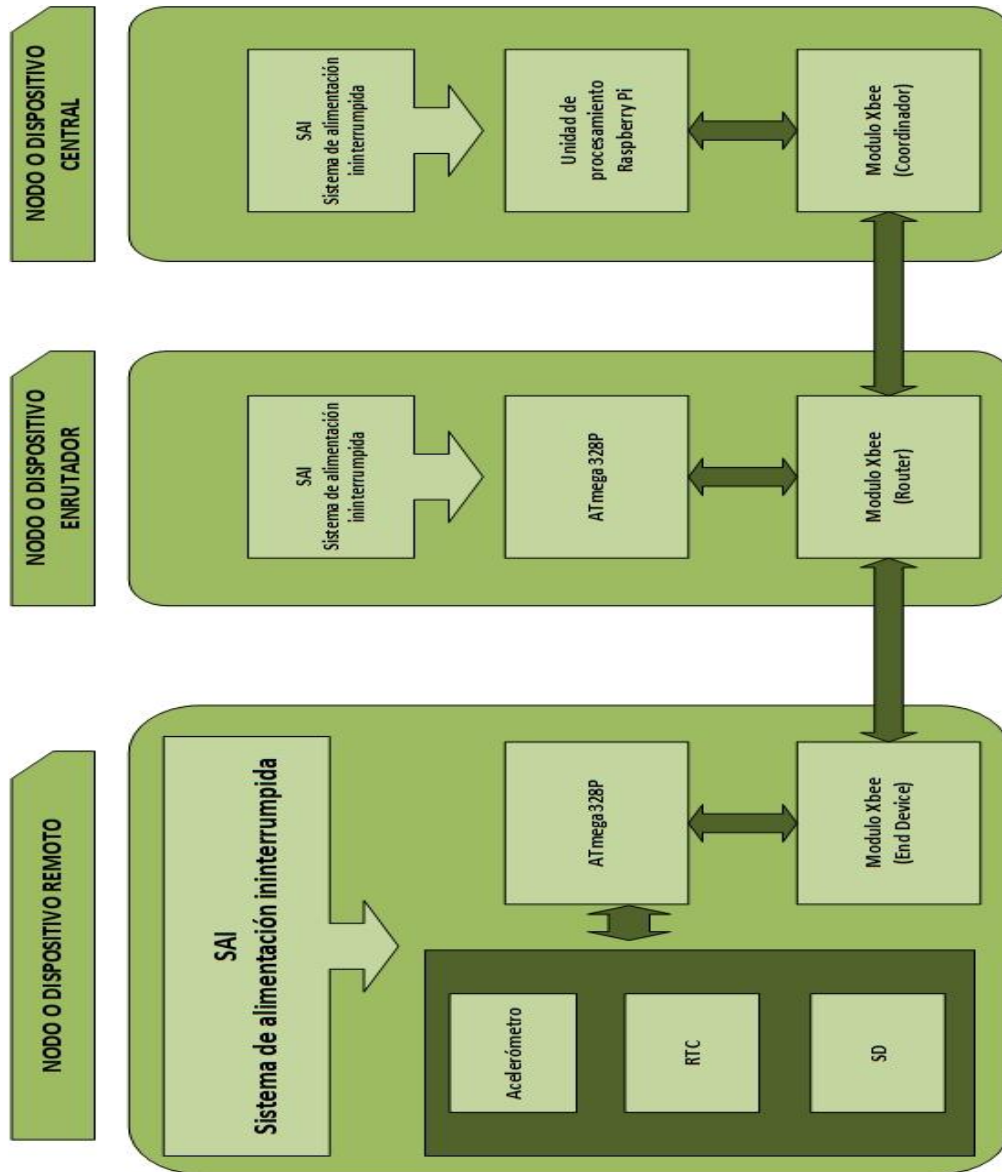


Ilustración 21. Diagrama de bloques del sistema electrónico de adquisición de vibraciones

Se cuentan con seis nodos en la solución implementada los cuales son descritos a continuación.

Nodos o dispositivos remotos, para la toma de datos y envió de manera inalámbrica hacia el nodo central, que corresponden a uno por cada piso monitoreados del edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, cada uno de estos consta de:

- Un módulo XBEE
- Un acelerómetro MPU 9250
- Un módulo RTC
- Un módulo de microSD
- Un Microcontrolador Atmega328P y un SAI

Los cuales fueron descritos anteriormente, la comunicación entre los dispositivos y el Microcontrolador Atmega328P se realiza utilizando el protocolo I2C.

Nodo o dispositivo enrutador o repetidor, que permite la conexión de los dispositivos remotos con el nodo central, para la solución implementa se cuenta con un nodo de este tipo, nos permite el alargamiento de la red, consta de:

- Un módulo XBEE
- Un Microcontrolador Atmega328P y un SAI

Nodo o dispositivo central que permite la recolección y procesamiento de datos consta de:

- Un módulo XBEE
- Una placa Raspberry Pi 3 modelo B + y un SAI

Dado que la placa Raspberry es utilizada para el procesamiento de los datos adquiridos, la generación de gráficos, la elaboración de reportes, ejecución de una interfaz gráfica y el almacenamiento en la nube de todo lo anterior, el modelo Raspberry Pi 3 modelo B +, que en comparación con modelos anteriores posee un mejor performance (ver tabla 4), resultando un procesamiento más eficaz de los datos y una ejecución más rápida de las tareas ejecutadas.

Además, la placa Raspberry Pi 3 modelo B + permite una conectividad de red con puertos Ethernet con una velocidad 10/100/1000 y tarjetas Wifi 802.11n/ac permitiendo mayores velocidades de conexión y operación de trabajo en la banda de 5Ghz.

Cada nodo del sistema cuenta con un módulo XBEE S2, debido a que permite la construcción de redes MESH en comparación de los XBEE S1, además de un menor consumo energético y sus menores costos comparados con los XBEE PRO, los módulos utilizados cuentan con antenas Wire o Whip que poseen de fábrica.

La topología de red utilizada corresponde a una red tipo árbol con un único camino entre el coordinador y los dispositivos finales, permitiendo una comunicación punto a multipunto.

3.12 Estuche protector a partir de tecnología de impresión 3D.

Para la instalación de los sistemas electrónicos de monitorización de vibraciones se diseñó un estuche protector que luego fue impreso utilizando la tecnología de impresión 3D. La función de cada estuche es mantener anclados los sensores a la columna del edificio y así adquirir los datos necesarios de la estructura. En total son 4 sensores y un repetidor, para lo cual se obtuvieron 5 estuches protectores cada uno de diferente material, los cuales son: PLA, wood fill, ABS y cooper fill. La ilustración 22 muestra los estuches obtenidos con tecnología de impresión 3D.

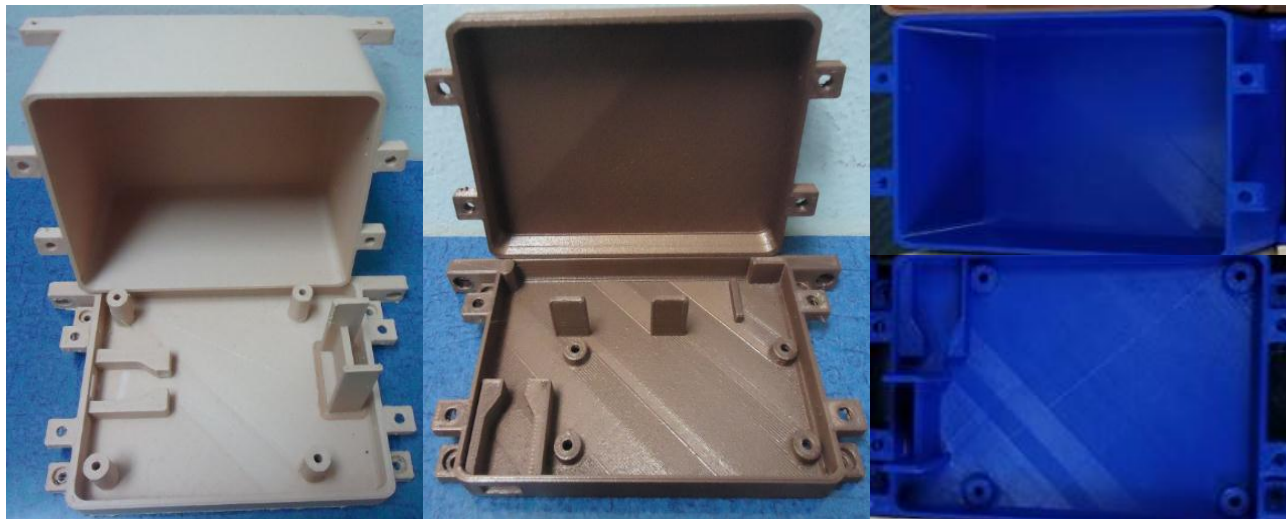


Ilustración 22. Estuches protectores de plástico con diferentes aditivos

3.13 Sistema de alimentación ininterrumpido

La ilustración 23 presenta el sistema de alimentación ininterrumpido para la Raspberry Pi 3 modelo B+ del proyecto que consiste de dos baterías de litio 18650 de 3.7 voltios, un circuito

TP4056 cargador y protector de baterías de litio y finalmente un circuito elevador de voltaje para suministrar los 5V que necesita para su funcionamiento la placa Raspberry Pi. En el momento que exista un corte de energía en el lugar donde fue instalado el sistema electrónico, el sistema de respaldo de alimentación ininterrumpida es capaz de mantener energizada el conjunto Raspberry Pi, la pantalla táctil 3.5" y el módulo de radiofrecuencia XBee durante un lapso aproximado de 6 horas.

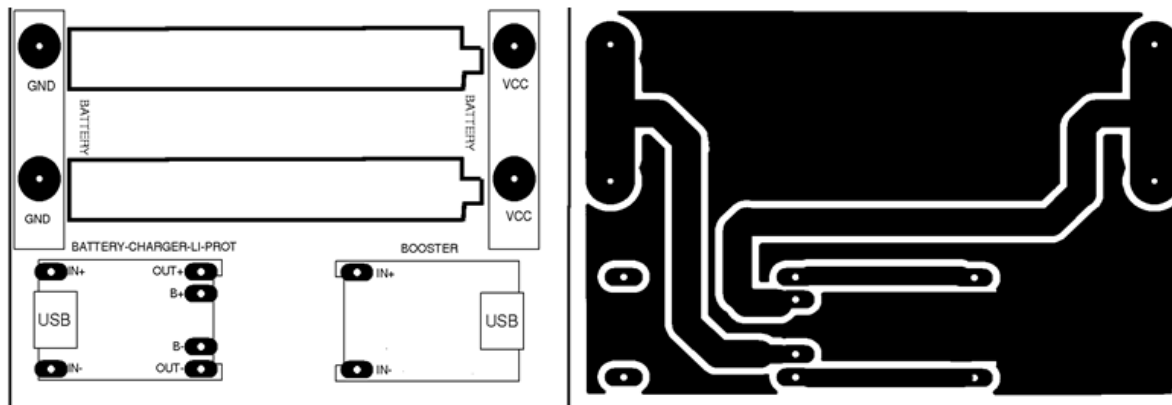


Ilustración 23. PCB del sistema de alimentación ininterrumpido, lado de componentes (izquierda) y lado de pistas (derecha)

A continuación se detalla cada uno de los elementos que constituyen el sistema de alimentación ininterrumpido:

El módulo cargador TP4056 presentado en la ilustración 24, es un dispositivo basado en el chip TP4056 cuya función es limitar la carga y descarga de las baterías de litio que no cuentan con protección interna y así alargar su vida útil. Cuando el voltaje de la batería cae por debajo de 2,4 V, el chip de protección desconectará la carga para proteger la celda de funcionar a una tensión demasiado baja y también protege contra la conexión de sobretensión y polaridad inversa, ya que, se destruirá en lugar de la batería.

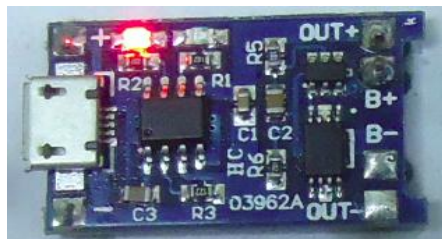


Ilustración 24. Módulo TP4056

- **Módulo step up booster DC-DC**

El módulo step up booster de la ilustración 25 es un convertidor DC a DC que obtiene a su salida una tensión continua mayor que a su entrada. Como voltaje de entrada se tiene el rango 2.5V a 5V para obtener a la salida 5V. El módulo es capaz de proporcionar 800mA máximo a la salida.



Ilustración 25. Módulo step up booster DC-DC

- **Panasonic 18650 3400mAh 3.7**

Las baterías recargables de litio Panasonic NCR 18650 son de bajo peso y alto rendimiento. Se pueden soldar en serie y en paralelo, para conseguir mayor capacidad. Tienen una excelente relación capacidad/peso, con 45.9 gramos y 3400mAh. Ofrece un amperaje máximo de 6.7A, una máxima carga de 4.20V, una resistencia interna de 45mOhm y sus dimensiones son 18mm x 65 mm, debido a esta última característica se le conoce como baterías de litio 18650, es decir, los dos primeros números indican su diámetro y los dos siguientes su longitud. Entre las ventajas que ofrece este tipo de batería es el nivel bajo de autodescarga, no exigen demasiado mantenimiento, son livianas y tienen una larga vida útil. Una desventaja es que al estar fabricadas con materiales inflamables pueden llegar a explotar por lo que es necesario agregar un circuito que gestione la carga, descarga y temperatura de estas baterías, como por ejemplo el módulo TP4056 que es capaz de detener la carga y descarga de las baterías de manera controlada.



Ilustración 26. Baterías de litio Panasonic 18650 3400mAh

Capítulo 4

4.1 Resultados del proyecto

Con la implementación e instalación del sistema electrónico para la adquisición remota de vibraciones en el edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura se genera un registro de datos que son utilizados para elaborar reportes y gráficos de manera automática en la placa Raspberry Pi 3 modelo B+ a través del lenguaje de programación Python. La ilustración 27 y 28 muestra los nodos sensores instalados en el edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura



Ilustración 27. Nodos sensores momento previo a ser instalados en el edificio D.



Ilustración 28. Nodos instalados en cada uno de los 4 pisos del edificio D.

4.1.1 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica fue diseñada bajo el lenguaje Python utilizando el módulo nativo de Tkinter, los objetivos principales de la interfaz gráfica son los siguientes:

- Monitoreo de los procesos ejecutados y el estado de los nodos.
- Realizar la adquisición de datos de manera programada.
- Realizar gráficos y reportes de los datos adquiridos.

- Realizar la adquisición y reportes de los reinicios ocurridos en los módulos XBee.
- Acceder a archivo histórico y a los distintos archivos generados.
- Eliminación de archivos almacenados en las microSD card de cada módulo.

4.1.1.1 Descripción de interfaz grafica

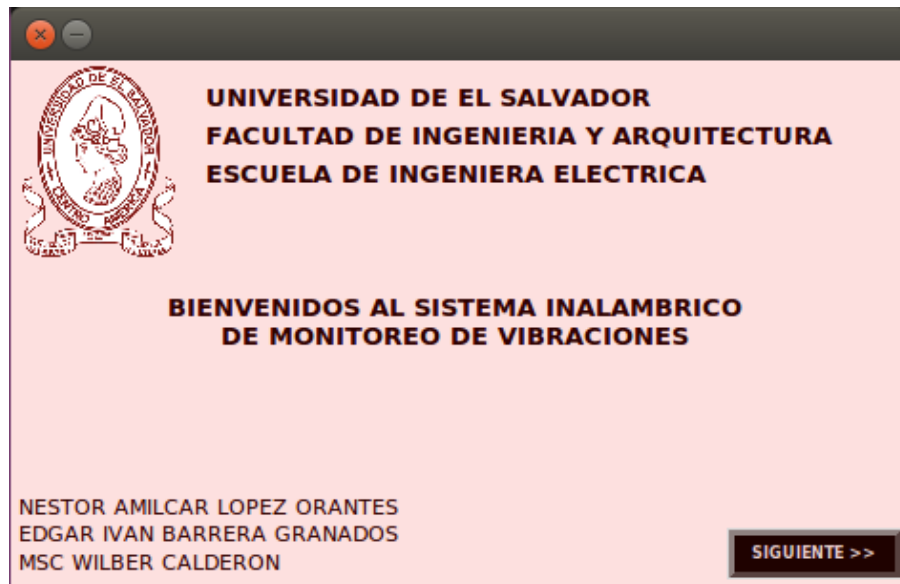


Ilustración 29. Ventana de inicio

La ventana de inicio mostrada en la ilustración 29 da una corta bienvenida al sistema así como también presenta el nombre de los autores.



Ilustración 30. Ventana de tareas

La ventana de tareas de la ilustración 30 y 31 es el lugar en la interfaz gráfica donde el usuario puede elegir el proceso a ejecutar consta de una barra de menú y de seis botones realizan diferentes acciones.



Ilustración 31. Ventana de tareas - Barra de menú

La barra de menú de la ventana de tareas consta de cuatro botones con menús desplegables

- 1- Tareas: Menú que contiene los mismos procesos que se presentan en la ventana de tareas, cada uno de estos será explicado posteriormente.
- 2- Históricos: Permite el acceso al archivo del histórico de datos que se actualiza cada vez que se realiza una recolección de datos desde los módulos.
- 3- Reinicios: Contiene dos acciones, la primera, solicitar a cada módulo sensor la cantidad de reinicios que ha tenido, la segunda, la tabulación esta información.
- 4- Eliminación: Permite la eliminación de datos de mediciones y de reinicios almacenados
- 5- Una Barra de estado que permite monitorear el estado de los procesos que se han ejecutado.

De la ventana principal la opción ‘Información del sistema’ nos permite acceder a la venta de información mostrada en la ilustración 32, la cual esta diseñada para realizar una consulta de manera individual a cada uno de los módulos XBee y de esta manera conocer su estado, si se

encuentra activos o inactivos, adicional es capaz de conocer parámetros físicos del dispositivo Raspberry Pi.



Ilustración 32. Ventana información del sistema

El botón programación automática permite la ejecución de una tarea diseñada para la adquisición de datos de manera automática a ejecutarse en la fecha y hora estipulada por los valores ingresados en cada campo. La ventana de la programación automática se presenta en la ilustración 33.



Ilustración 33. Ventana de programación automática del sistema

El botón 'Sistema Manual' despliega la ventana mostrada en la ilustración 34, la cual permite la ejecución de tareas específicas:

- Captura de datos: Realiza la adquisición de datos, solicita los datos a cada módulo sensor, una vez finalizada la adquisición, genera una carpeta y una hoja de cálculo correspondiente a la fecha y hora en que se inició el proceso paralelamente genera la hoja de cálculo que almacena todos los datos creando así un archivo historial de datos.
- Generar gráficos: a partir de la hoja de cálculos obtenida con la tarea anterior, este botón genera gráficos de línea para la representación visual de los datos.
- Generar reportes: una vez obtenidos la hoja de cálculo con los datos adquiridos de los módulos sensores, este botón elabora un reporte en formato pdf que contiene los gráficos correspondientes a los datos de la hoja de cálculo, la ejecución de la tarea del ítem anterior no es imprescindible para elaborar un reporte.



Ilustración 34. Ventana de tareas - Sistema Manual

El botón 'Revisar Datos' de la ilustración 35 permite la verificación de los archivos generados con cualquiera de las opciones anteriores



Ilustración 35. Ventana de tareas-Revisar Datos

4.1.2 Evaluación los datos almacenados

4.1.2.1 Hoja de cálculo

Al adquirir los datos desde cada uno de los módulos sensores ya sea de manera automática o manual si obtienen una hoja de cálculo que contiene los datos organizados por pisos, en la ilustración 36 se visualiza la hoja de cálculo generada por el programa Python.

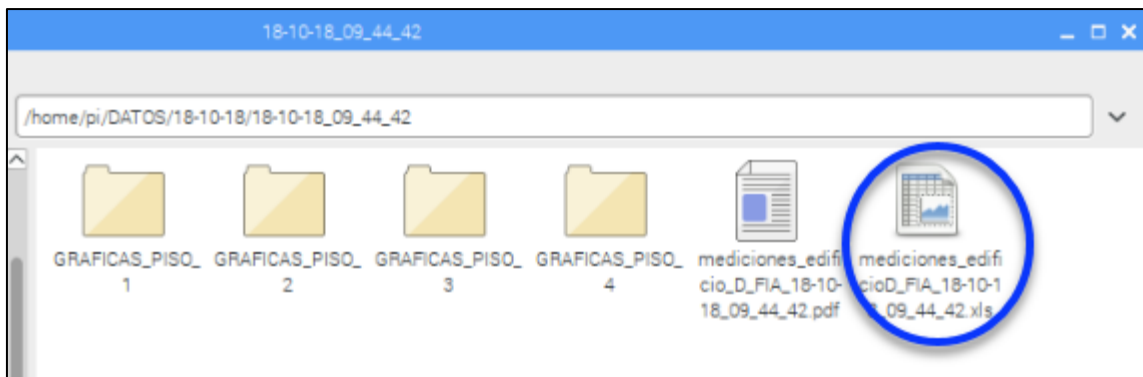


Ilustración 36. Hoja de cálculo obtenido al procesar datos

Tal como se visualiza en la ilustración 37, cada hoja de cálculo contiene ‘n’ cantidad de pestañas correspondiente a la cantidad de pisos que se analizan, la hoja de cálculo posee en su totalidad 19 columnas de las cuales las primeras ocho son las obtenidas desde los módulos sensores, estas están organizadas de la siguiente manera:

- Columna 1: Tiempo en que se toma la muestra, dado por los módulos de RTC de cada piso.
- Columna 2: Correlativo de cada muestra.
- Columna 3: Aceleraciones en el eje X.
- Columna 4: Aceleraciones en el eje Y.
- Columna 5: Aceleraciones en el eje Z.
- Columna 6: Velocidades angulares en el eje X.
- Columna 7: Velocidades angulares en el Y.
- Columna 8: Velocidades angulares en el Z.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	TIEMPO	No.	AX	AY	AZ	G X	G Y	G Z
2	16:53:56	1	1345	3525	-1406	320	340	-11
3	16:53:56	2	-323	1113	1914	599	-329	-8
4	16:53:56	3	5	-1715	1326	245	399	-10
5	16:53:56	4	-1595	705	-322	328	-547	-26
6	16:53:56	5	1869	-23	878	132	522	-39
7	16:53:56	6	289	2205	-298	-124	-438	-17
8	16:53:56	7	313	-2327	1162	453	308	39
9	16:53:56	8	-475	661	-42	-276	-268	-46
10	16:53:56	9	857	1737	314	202	77	12

Ilustración 37. Datos proporcionados por los módulos sensores

A partir de este punto se realizan modificaciones en la hoja de cálculo analizadas para obtener valores adicionales a los obtenidos, las siguientes seis columnas corresponden a una aproximación matemática realizada la cual consta en multiplicar las aceleraciones obtenidas para las columnas de la tres a la ocho por un constante correspondiente a:

$$constanteT = \frac{1 \text{ segundo}}{\text{muestras}}$$

Donde “muestras” es el número de muestras promedio obtenidas en un segundo, el valor obtenido es consideración del valor de velocidad a partir de la aceleración.

	I	J	K	L	M	N
1	<u>VELOCIDAD X</u>	<u>VELOCIDAD Y</u>	<u>VELOCIDAD Z</u>	<u>VELOCIDAD GX</u>	<u>VELOCIDAD GY</u>	<u>VELOCIDAD GZ</u>
2	7.911764704	20.73529411	-8.27058823	1.882352941	2	-0.06470588
3	-1.9	6.547058822	11.25882353	3.523529411	-1.93529412	-0.04705882
4	0.029411765	-10.0882353	7.799999998	1.44117647	2.347058823	-0.05882353
5	-9.38235294	4.147058823	-1.89411765	1.929411764	-3.21764706	-0.15294118
6	10.99411764	-0.13529412	5.164705881	0.776470588	3.070588235	-0.22941176
7	1.7	12.97058823	-1.75294118	-0.72941176	-2.57647059	-0.1
8	1.84117647	-13.6882353	6.835294116	2.664705882	1.811764706	0.229411765
9	-2.79411765	3.888235293	-0.24705882	-1.62352941	-1.57647059	-0.27058824
10	5.04117647	10.21764706	1.847058823	1.188235294	0.452941176	0.070588235

Ilustración 38. Columnas correspondientes a las velocidades

De igual manera las siguientes seis columnas corresponden nuevamente a una aproximación, pero esta vez de los desplazamientos obtenidas al realizar la multiplicación de las columnas nueve a las 14 por la constante antes nombrada. Los valores de velocidad y desplazamiento en los tres ejes son organizados en columnas tal como se visualiza en la ilustración 38 y 39.

	O	P	Q	R	S	T
1	<u>DESPLAZAMIE NTOS X</u>	<u>DESPLAZAMIE NTOS Y</u>	<u>DESPLAZAMIE NTOS Z</u>	<u>DESPLAZAMIE NTOS GX</u>	<u>DESPLAZAMIE NTOS GY</u>	<u>DESPLAZAMIE NTOS GZ</u>
2	0.046539792	0.121972318	-0.04865052	0.011072664	0.011764706	-0.00038062
3	-0.01117647	0.038512111	0.066228374	0.020726644	-0.01138408	-0.00027682
4	0.00017301	-0.05934256	0.045882353	0.008477509	0.013806228	-0.00034602
5	-0.05519031	0.024394464	-0.01114187	0.011349481	-0.01892734	-0.00089965
6	0.06467128	-0.00079585	0.030380623	0.004567474	0.018062284	-0.00134948
7	0.01	0.076297578	-0.01031142	-0.00429066	-0.01515571	-0.00058824
8	0.01083045	-0.08051903	0.040207612	0.01567474	0.010657439	0.001349481
9	-0.01643599	0.022871972	-0.00145329	-0.00955017	-0.00927336	-0.0015917
10	0.029653979	0.060103806	0.010865052	0.006989619	0.00266436	0.000415225

Ilustración 39. Columnas correspondientes a los desplazamientos

4.1.2.2 Generación de gráficos

Una vez obtenido la hoja de cálculo final con los valores de interés, se pueden obtener gráficos para la representación visual de los datos. La ilustración 40 muestra las carpetas generadas mediante lenguaje Python que contienen los gráficos de los datos obtenidos de cada uno de los 4 pisos del edificio D de la facultad de Ingeniería y Arquitectura.

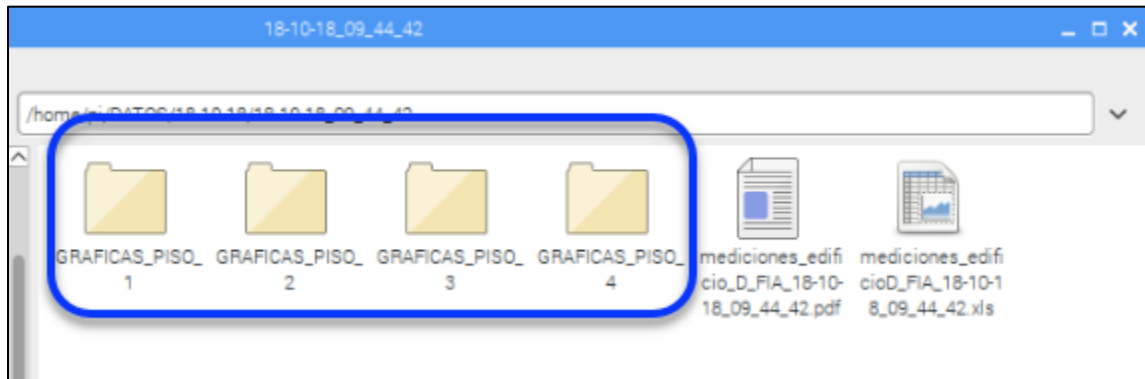


Ilustración 40. Gráficos obtenidos al procesar datos

Los gráficos elaborados se pueden clasificar en:

- Gráficos individuales para las aceleraciones en los 3 ejes
- Gráficos individuales para las velocidades en los 3 ejes
- Gráficos individuales para los desplazamientos en los 3 ejes
- Gráficos individuales para las velocidades angulares en los 3 ejes
- Gráficos individuales para los desplazamientos del giroscopio en los 3 ejes

Teniendo un total de 18 gráficos individuales por pisos, también se cuenta con gráficos resumen para cada uno de los ítems anteriores en el cual en una sola imagen se tiene tres gráficos generados:

- Gráficos grupales para las aceleraciones en los 3 ejes
- Gráficos grupales para las velocidades en los 3 ejes
- Gráficos grupales para los desplazamientos en los 3 ejes
- Gráficos grupales para las velocidades angulares en los 3 ejes
- Gráficos grupales para los desplazamientos del giroscopio en los 3 ejes

Adicionando entonces seis gráficos más resultando 24 gráficos por piso.

En la ilustración 41 se observan todos los gráficos contenidos en la carpeta referente al piso 1 del edificio que fueron generados automáticamente mediante lenguaje Python.

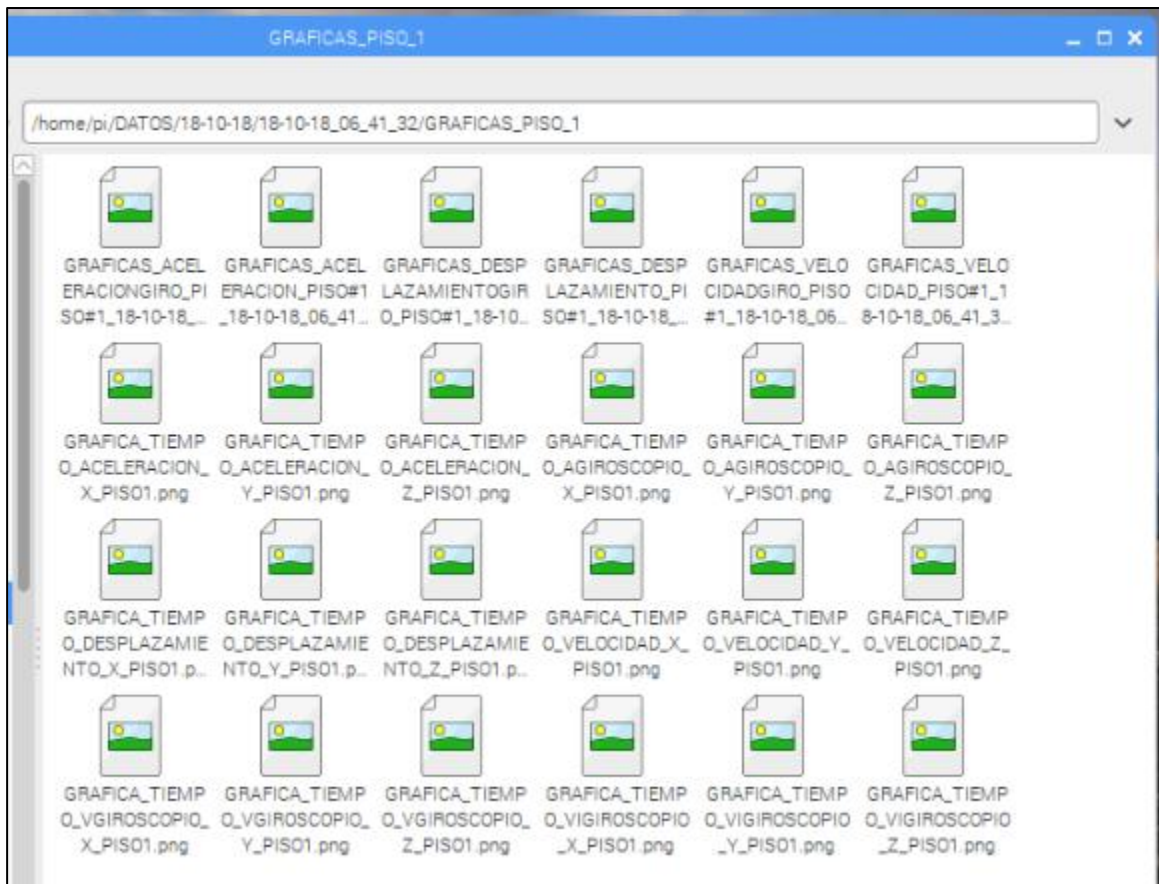


Ilustración 41. Contenido de una carpeta de gráficos

4.1.2.3 Análisis de gráficos

Un gráfico grupal contiene una cuadrícula de cuatro espacios donde en tres de ellos son insertados tres gráficos individuales de una magnitud (aceleración, velocidad y desplazamiento) tanto como para las coordenadas X, Y, Z como para los valores obtenidos en el giroscopio en los tres ejes. En la ilustración 42 se muestra un gráfico grupal con los gráficos de las aceleraciones en los tres ejes ortogonales.

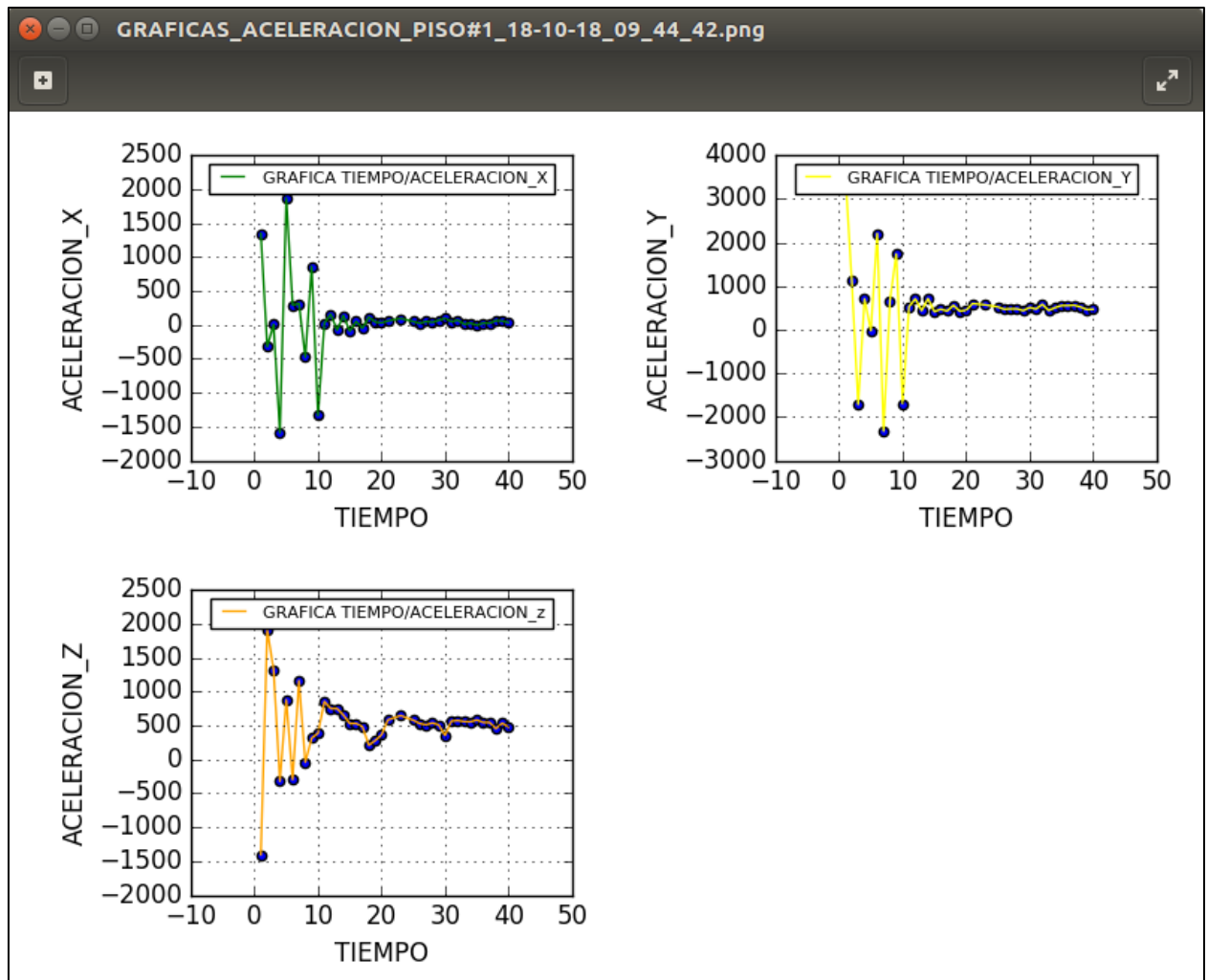


Ilustración 42. Gráficos grupales por magnitud

En los gráficos individuales se pueden observar con mejor detalle la representación de los datos para una magnitud en cualquier de los ejes o el valor proporcionado por el giroscopio.

El eje 'Y' corresponde a los valores obtenidos por los sensores y organizados en las columnas de la tres a las diecinueve, en cambio el eje 'X' proporciona únicamente el valor correspondiente al correlativo de la columna dos de la hoja de cálculo que a su vez corresponde a un valor de tiempo de la columna uno, de esta manera se evita la inserción de múltiples valores en un único punto dado que cada aproximadamente se toman 170 muestras en un segundo.

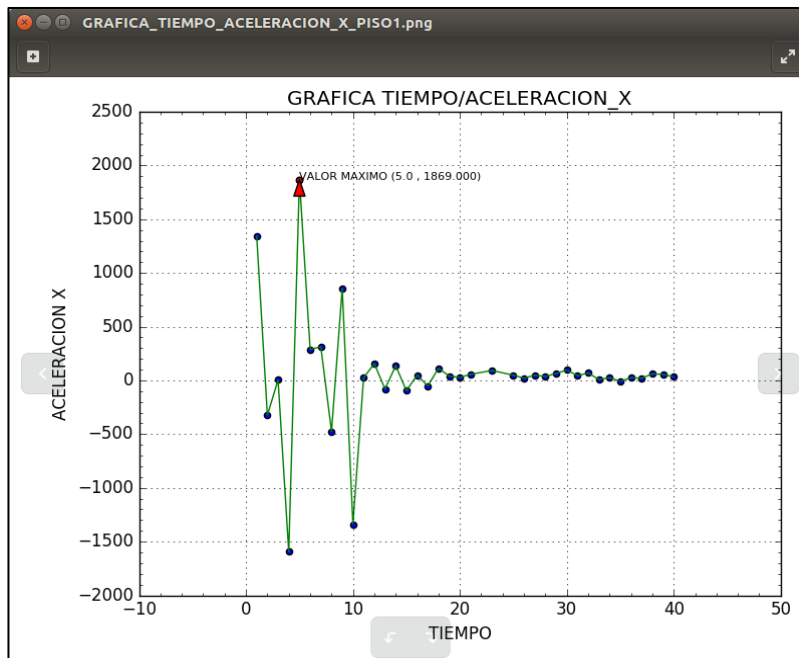


Ilustración 43. Gráfico tiempo vs aceleración eje X

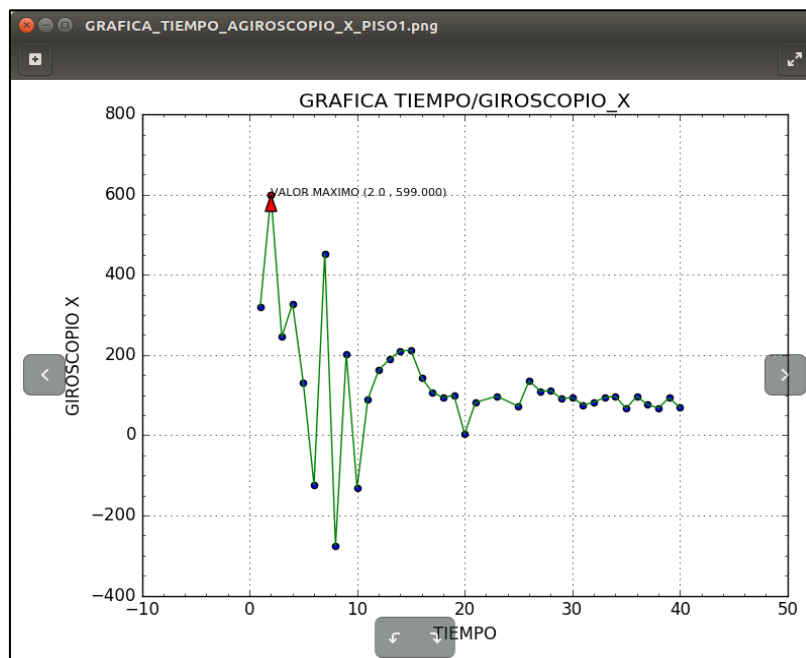


Ilustración 44. Gráfico tiempo vs giroscopio eje X

Cada gráfico individual mostrado en la ilustración 43 y 44 proporciona el valor máximo obtenido para la magnitud graficada.

4.1.2.4 Reportes

Los reportes elaborados por el sistema es una manera de ordenar los gráficos resultados y obtener un archivo que facilite la lectura de estos, es un archivo con formato pdf, que dada la cantidad de gráficos generados dedica 15 páginas por piso.

Inserta de manera ordena los gráficos tal como se observa en la ilustración 45 y 46, iniciando por los gráficos grupales dividiéndolos por magnitudes.

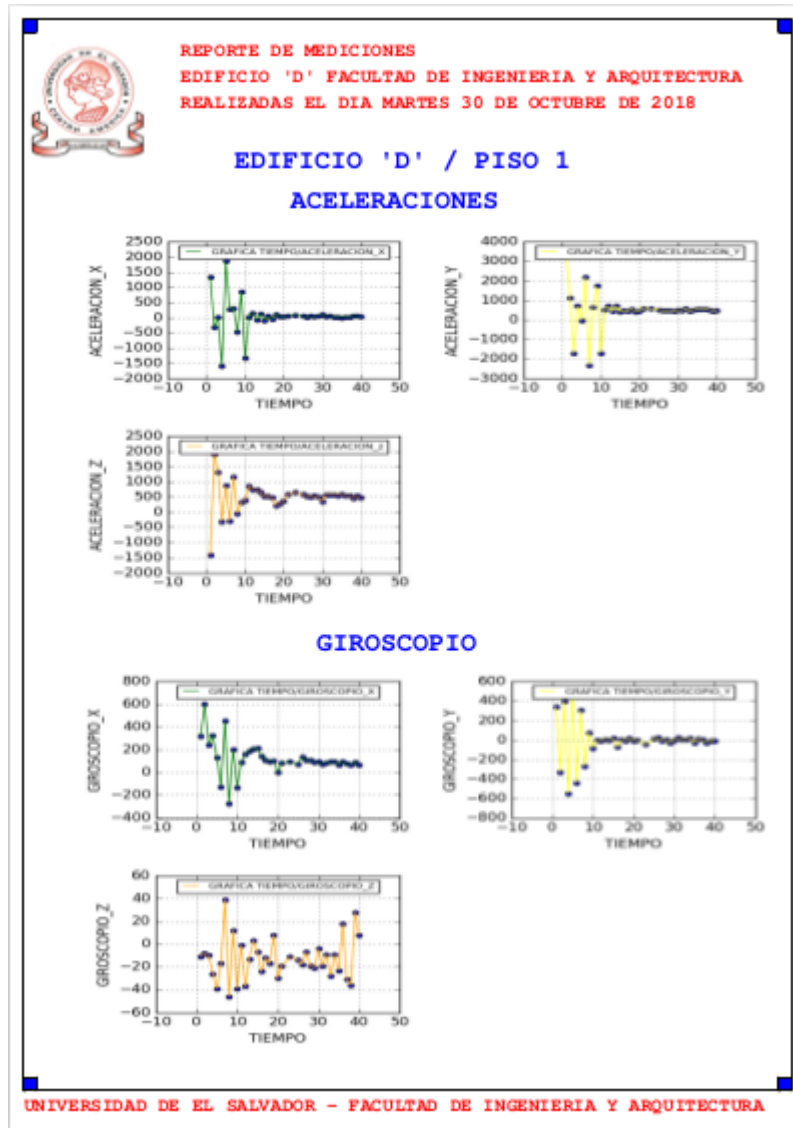


Ilustración 45. Gráficos grupales en reporte

La estructura del reporte contiene un encabezado que identifica el día en que se realizó el reporte y el lugar en que se realizan las mediciones (esto editable únicamente a través del código

fuente), cada gráfico contiene una leyenda que diferencia de los demás facilitando la visualización e interpretación de los datos obtenidos

Los gráficos individuales en los reportes de igual manera contienen identificadores para cada uno de ellos además de presentar el valor máximo para cada gráfico.

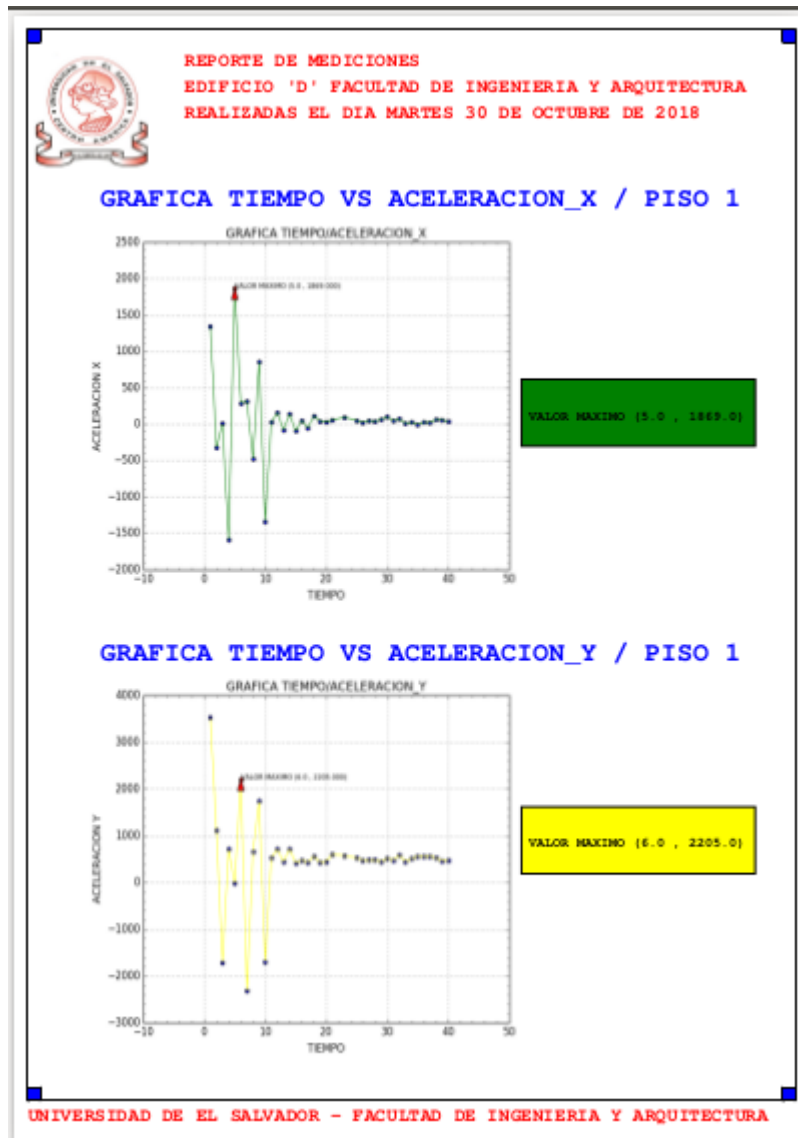


Ilustración 46. Gráficos individuales en reporte

4.1.2.5 Interpretación de los resultados

El sistema electrónico de adquisición de vibraciones se instaló en cada uno de los cuatro pisos del edificio D de la facultad de ingeniería y arquitectura el día 13 de octubre del 2018 y se obtuvieron datos durante un mes, siendo el 12 de noviembre del 2018 el día de finalización de adquisición de vibraciones. A partir de las muestras de aceleraciones de partícula en los ejes X, Y y Z, se obtiene mediante suma vectorial, las vibraciones totales que contenga la contribución de los 3 ejes ortogonales mediante la fórmula $A = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$, donde los valores de X, Y y Z representan las aceleraciones en los respectivos ejes. Con dichas aceleraciones totales se obtiene el valor RMS de las muestras de cada piso del edificio al aplicar la raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de los datos según la fórmula para calcular el valor efectivo dado por $A_{RMS} = \sqrt{\frac{A1^2 + A2^2 + A3^2 + \dots}{N}}$, donde N es el número de muestras por piso. La frecuencia de muestreo de los nodos sensores fue de 170 muestras por segundo, por tanto se multiplica el periodo de muestreo (1/170) con los datos de aceleración para obtener velocidad de partícula. En la tabla 6 se presentan los valores RMS resultantes de las vibraciones obtenidas en cada piso del edificio.

PISO	$A_{RMS} (m/s^2)$	$V_{RMS} (m/s)$
4	624.18	3.87
3	424.87	2.50
2	303.70	1.79
1	123.14	0.72

Tabla 6 Aceleraciones y velocidades RMS resultantes en cada piso del edificio.

Se observa en los resultados finales mostrados en la tabla 6 que la velocidad de partícula en el cuarto piso del edificio D de la FIA es de 3.87 mm/s, por tanto cumple con la norma alemana DIN 4150 que establece un límite máximo de velocidad de partícula de 5 mm/s en el edificio.

4.1.2.6 Comparación económica y técnica con dispositivo comercial.

El medidor de vibraciones para edificios serie PCE-VM tiene un precio de \$2000, sirve para medir oscilaciones, vibraciones y temblores en edificios, puentes, torres u otras construcciones. El medidor de vibraciones para edificios cumple con las normas DIN 4150 y cuenta con un sensor de aceleración triaxial y una tarjeta microSD integrada. Gracias a su función de registro de datos, podrá guardar eventos según la fecha de registro. Una vez registrado los valores de vibración, es posible visualizar los valores en pantalla. Además es capaz de mostrar la máxima amplitud de la vibración.



Ilustración 47. Medidor de vibración PCE-VM con pantalla LCD

Fuente: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-vibracion-pce-instruments-medidor-de-vibraci_n-pce-vm-40a-det_2215157.htm

Observamos que el dispositivo comercial tiene un costo bastante mayor a los \$760 del costo del dispositivo diseñado en la presente investigación. En cuanto a funciones técnicas, ambos dispositivos son similares ya que ambos cuentan con memoria interna tipo microSD para almacenar los datos de las vibraciones, un acelerómetro triaxial, un reloj de tiempo real para registrar el día y la hora del evento vibratorio y finalmente, una pantalla para observar los datos registrados. Un factor diferenciador con el que cuenta el dispositivo electrónico de adquisición de vibraciones diseñado en la presente trabajo de tesis es la posibilidad de transmitir de manera inalámbrica de los datos hacia un nodo central.

Recomendaciones

A continuación, se presentan una serie de recomendaciones para líneas futuras de investigación cuya implementación mejorarían la operatividad de la solución presentada:

- La modificación del diseño de la solución, elaborada y desarrollada específicamente para la monitorización continua de vibraciones de los cuatro pisos del edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador , en un sistema escalable y modular que permita que la solución pueda ser implementada en diferentes edificaciones y estructuras.
- Efectuar un estudio y análisis del espectro de radiofrecuencia en el sitio donde se implementará la solución para la verificación de disponibilidad de las bandas de operación de los dispositivos inalámbricos.
- Envío de los reportes generados vía correo electrónico mediante la placa Raspberry Pi 3.
- Considerar el remplazo de los módulos XBee S2 por XBee PRO para el mejoramiento de la cobertura en edificaciones o ambientes que pudiesen provocar atenuaciones de la señal de los dispositivos.
- Desarrollo de una base de datos para el almacenamiento de los datos obtenidos, mejorando y ampliando el método de hojas de cálculo implementado.
- Sustitución de módulos XBee por dispositivos o módulos que permitan una mayor tasa de transferencia de datos, permitiendo una agilización en el proceso de intercambio de información entre los nodos.
- Realzar la calibración de los acelerómetros MPU 9250 mediante equipo específicos y/o de laboratorio para garantizar y validar los datos obtenidos.
- Realizar la comparación de los datos obtenidos por los acelerómetros MPU 9250 mediante equipo de industriales o comerciales para realizar estudios de mercado.
- Elaboración de case más amplios para una mejor distribución de los elementos en cada nodo.

Conclusiones

El objetivo conseguido ha sido el diseño e implementación de un sistema electrónico con comunicación inalámbrica utilizando el protocolo ZigBee para la monitorización continua de vibraciones en el edificio D de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador. Los cuatro nodos estratégicamente instalados en cada uno de los 4 pisos de la edificación pero en una sola columna, proporcionaron los datos requeridos siendo almacenados para su análisis.

La red correctamente funcional fue diseñada con 4 nodos sensores, un nodo repetidor y un nodo coordinador encargado de gestionar la comunicación con el resto de nodos para recibir los datos de manera inalámbrica y almacenarlos en la placa Raspberry Pi 3, esta última con conectividad a internet los mantiene disponible en Google Drive a través del software Insync. Cada nodo es capaz de reenviar datos a los demás y la decisión sobre que nodo reenvía los datos se realiza de forma dinámica en la conectividad de la red.

Al requerir transmitir una gran cantidad de información como las aceleraciones y velocidades angulares registradas por los sensores, los 250kbps máximos de tasa de transferencia ofrecidos por el protocolo ZigBee produce un elevado periodo de tiempo en transmitir la totalidad de datos, sumado a que cada trama tiene incluida la hora, minuto y segundo en que sucedió el movimiento vibratorio en el edificio.

El sistema de alimentación ininterrumpida fue capaz de mantener energizado el conjunto Raspberry Pi 3, pantalla táctil de 3.5" y módulo XBee a pesar de tener cortes de energía eléctrica durante las pruebas de funcionamiento. También cada nodo sensor así como el nodo repetidor lograron continuar en funcionamiento utilizando baterías recargables de litio como respaldo.

Durante las pruebas de cobertura se concluyó que sería más adecuado incluir en la red un par de módulos XBee PRO en la conexión entre los nodos instalados en el edificio D de la facultad y el nodo coordinador ubicado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, esto debido a las atenuaciones de la señal provocadas por el hormigón de las paredes y la vegetación circundante.

Finalmente los reportes y gráficos fueron correctamente generados por el lenguaje de programación Python en la placa Raspberry Pi 3 a partir de los datos.

Referencias bibliográficas

1. ADASH. (s.f.). *Diagnóstico de vibraciones*. Recuperado el 25 de Enero de 2019, de <https://adash.com/es/diagnostico-vibraciones/Qu%C3%A9-medidas-debo-tomar%3F/?%2F=>
2. andrewrapp. (31 de Diciembre de 2016). *GitHub*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <https://github.com/andrewrapp/xbee-arduino>
3. Arduino, A. (2018). *ZigBee/XBee*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>
4. community, T. S. (16 de abril de 2018). *docs.scipy.org*. Recuperado el 2018 de mayo de 13, de <https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/routines.html>
5. contributors, x. (2018). *xlwt.readthedocs.io*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de <http://xlwt.readthedocs.io/en/latest/api.html>
6. Corporation, A. (11 de 2016). *Atmel-42735B-ATmega328/P_Datasheet_Complete-11/2016*. Obtenido de [www.microchip.com: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf)
7. Crespo, E. (09 de Julio de 2017). *Aprendiendo Ardu*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/07/09/i2c/>
8. DELGADO, J. E. (2013). *PROTOTIPO DE INTERFACE SAFETY FOR FIREFIGHTERS CON MÓDULOS XBEE SOBRE ANDROID Y SQLITE*. pág.8-11. Valdivia, Chile.
9. *Es.wikipedia.org*. (09 de 09 de 2018). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi
10. Faludi, R. (2010). *Building wireless sensor networks*. Sebastopol, California: O'Reilly Media.
11. Foundation, P. S. (08 de mayo de 2018). *Docs.python.org*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de <https://docs.python.org/3/library/time.html>
12. Foundation, P. S. (08 de mayo de 2018). *Docs.python.org*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de <https://docs.python.org/3/library/os.path.html>

13. Foundation, P. S. (s.f.). *Docs.python.org*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018, de <https://docs.python.org/3/library/subprocess.html>
14. Foundation, P. S. (s.f.). *PyPI*. Obtenido de <https://pypi.org/project/python-crontab/>
15. GALLARDO, Y. (6 de Agosto de 2015). DESARROLLO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS CON GESTIÓN Y SUPERVISIÓN REMOTA MEDIANTE UN SERVIDOR WEB. pág.32-34. Barbula, Venezuela.
16. Guevara, R. (24 de Noviembre de 2016). <http://www.elsalvador.com>. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <http://www.elsalvador.com/noticias/nacional/207009/13-terremotos-que-han-azotado-a-el-salvador/>
17. Hunter, J., Dale, D., Firing, E., & Droelboom, M. (05 de mayo de 2018). *Matplotlib.org*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de https://matplotlib.org/api/pyplot_summary.html
18. International, D. (2015). *XBee buying guide - XBee / Arduino Compatible Coding Platform - Digi Docs*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <http://docs.digi.com/display/XBeeArduinoCodingPlatform/XBee+buying+guide>
19. International, D. (30 de Noviembre de 2017). *Wireless Connectivity Kit*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90001456-13/Default.htm#concepts/c_api_frame_structure.htm%3FTocPath%3DXBee%2520API%2520mode%7C_____2
20. kriswiner. (29 de Enero de 2016). *GitHub*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <https://github.com/kriswiner/MPU6050/wiki/Affordable-9-DoF-Sensor-Fusion>
21. Liechti, C. (2015). *pythonhosted.org*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de https://pythonhosted.org/pyserial/pyserial_api.html
22. Llamas, L. (14 de Mayo de 2016). *Ingeniería, informática y diseño*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>
23. Llamas, L. (29 de Mayo de 2018). *Ingeniería, informática y diseño*. Recuperado el 2018 de Mayo de 13, de <https://www.luisllamas.es/usar-arduino-con-los-imu-de-9dof-mpu-9150-y-mpu-9250/>
24. López, J. M. (16 de Noviembre de 2016). <http://redesinalambricasunidad6.blogspot.com/>. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <http://redesinalambricasunidad6.blogspot.com/2016/11/introduccion.html>

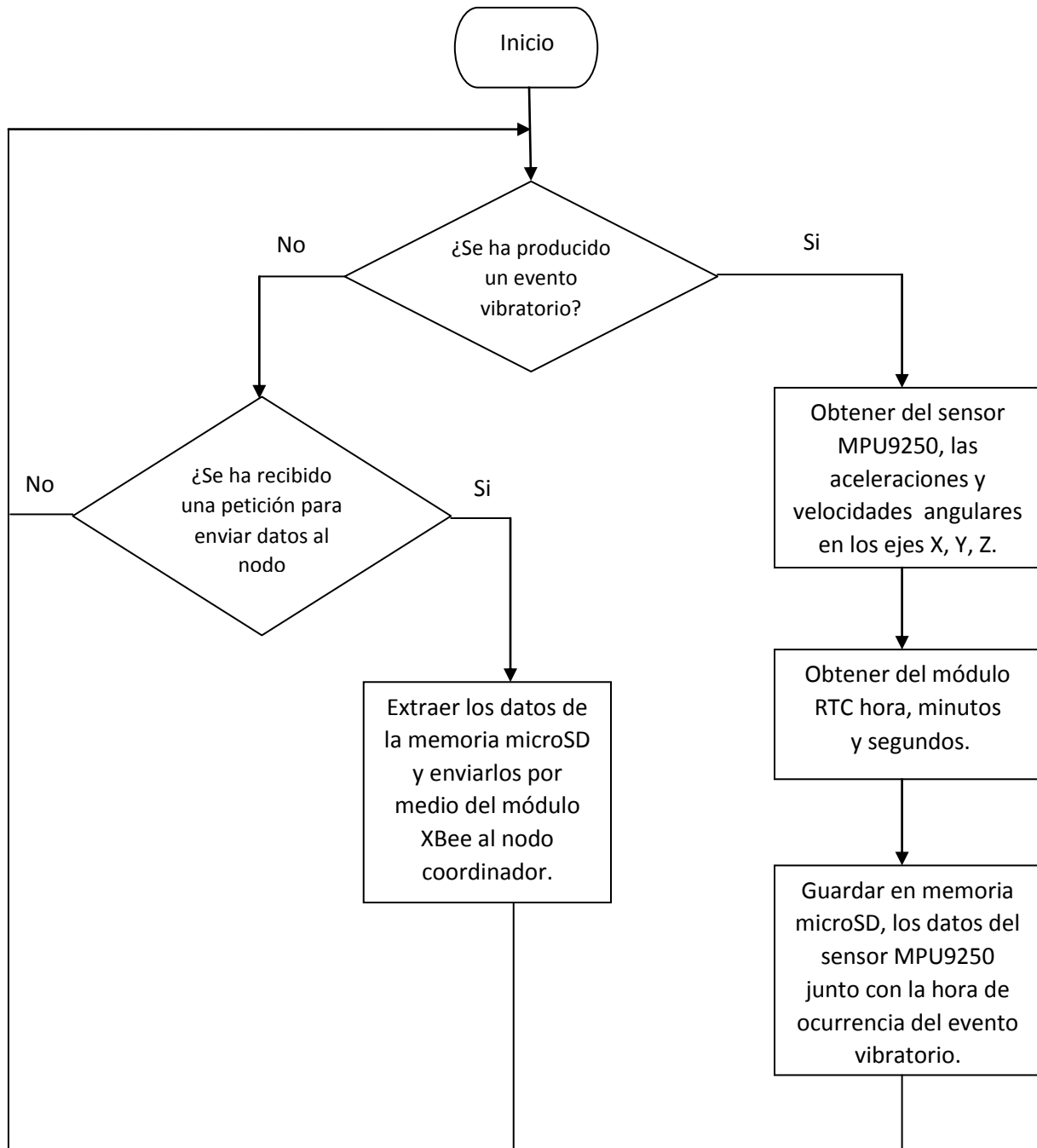
25. Ltd, S. (2018). *xlutils.readthedocs.io*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de <http://xlutils.readthedocs.io/en/latest/api.html>
26. M., M. G., & Moreno, J. (23 de Mayo de 2012). *Sx-de-tx.wikispaces.com*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de <https://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>
27. Machin, S. J. (2018). *xlrd.readthedocs.io*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de <http://xlrd.readthedocs.io/en/latest/api.html>
28. Marroquin, G. (2002). Actividad sísmica en El Salvador durante el año 2002 en comparación con la sismicidad de años anteriores 1997-2001. pág.1. San Salvador.
29. Normung, D. I. (2001). Vibration in buildings - part 3: Effects on structures. pág.89. Berlin.
30. Oyarce, A. (Agosto de 2008). *Mcielectronics.cl*. Recuperado el 13 de Mayo de 2018, de http://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/XBee_Guia_Usuario.pdf
31. ReportLab, I. (19 de 06 de 2017). *ReportLab PDF Library*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de <https://www.reportlab.com/docs/reportlab-userguide.pdf>
32. Salcedo, L. (16 de 10 de 2017). *PythonDiario*. Recuperado el 13 de mayo de 2018, de <http://www.pythondiario.com/2017/10/creacion-de-archivos-pdf-con-python-y.html>
33. Sanchez Baron, A. V., & Gonzales Godoy, C. Z. (2017). DISEÑO Y SIMULACIÓN DE RED DE COMUNICACIÓN EN LA MINA DE CARBÓN SANTA MARÍA EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO BOYACÁ. Bogota, Colombia.
34. Digi International Inc, (23 de 09 de 2009). Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol. Recuperado el 25 de enero de 2019, de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>

Anexos

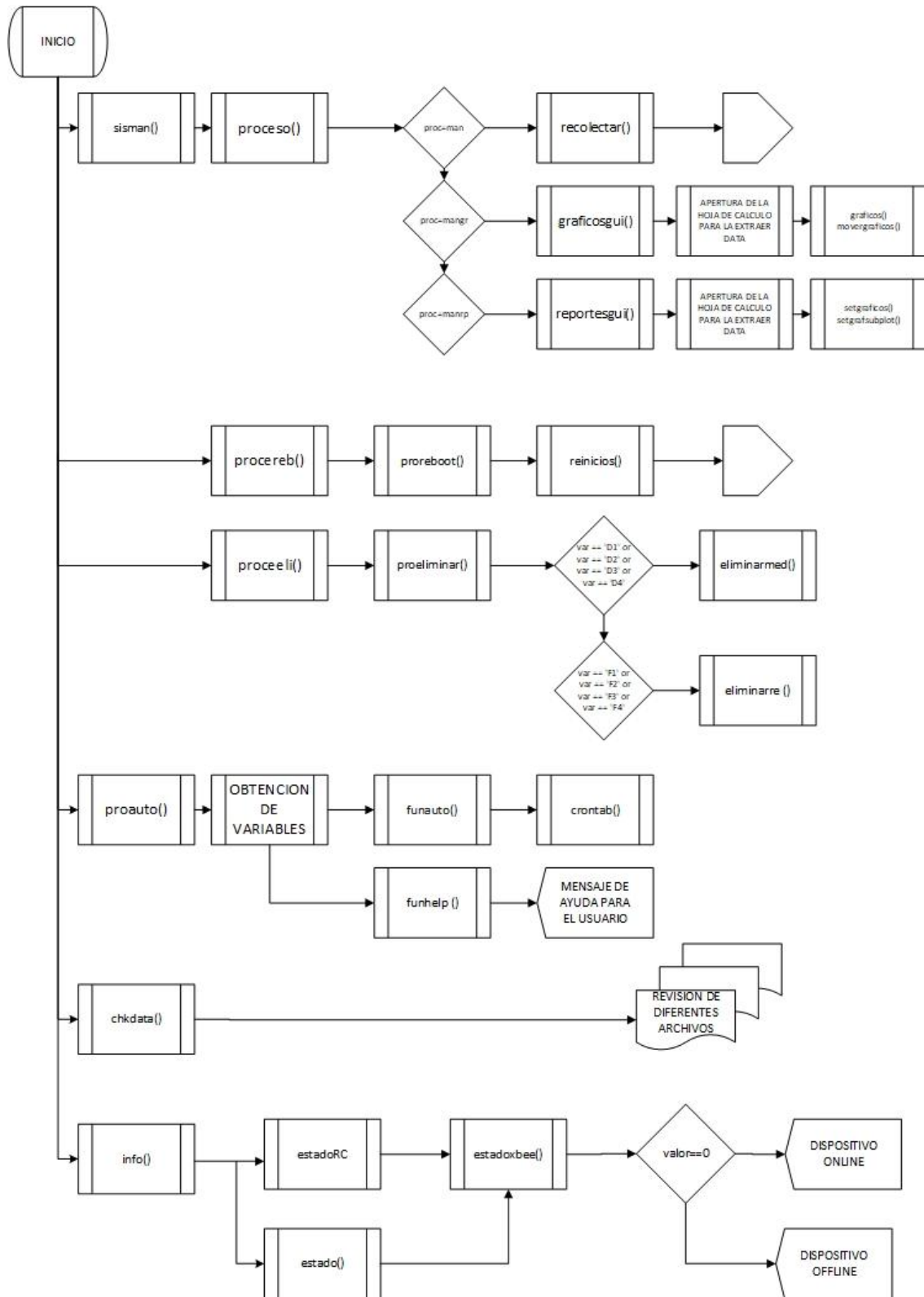
Anexo I: Tabla de costos del proyecto.

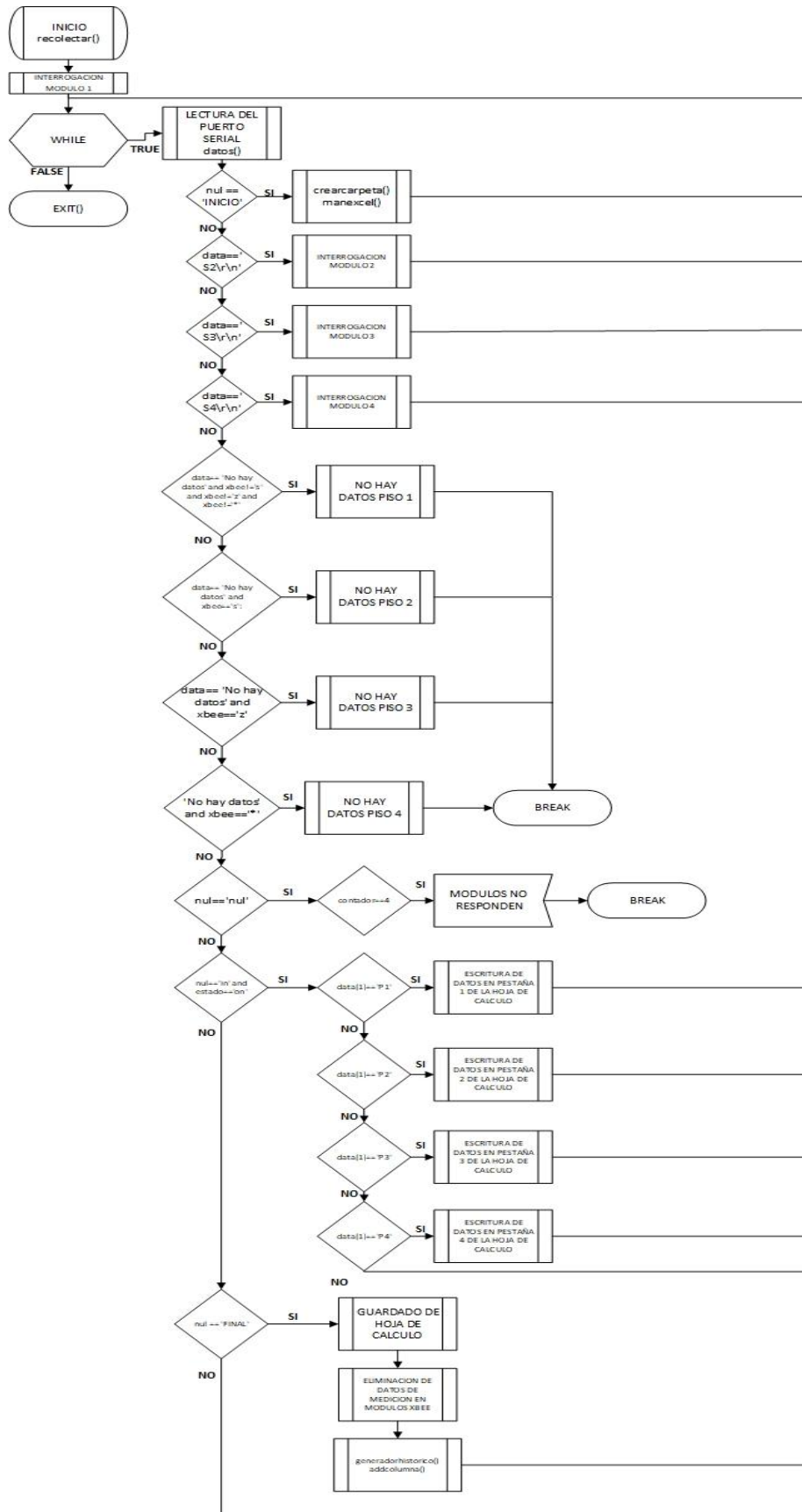
Elemento	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Microcontrolador Atmega 328P	\$6.87	4	\$27.48
Módulo Step up booster 1V-5V a 5V	\$6.86	1	\$6.86
MPU 9250 acelerómetro y giroscopio	\$9.35	4	\$37.40
Pantalla táctil 3.5" TFT 320x480 para Raspberry	\$25.40	1	\$25.40
Raspberry Pi 3 B+	\$60.00	1	\$60.00
Case acrílico y ventilador 5V para Raspberry Pi	\$12.25	1	\$12.25
XBee S2 2mW Wire Antenna -Series 2	\$25.00	6	\$150.00
Módulo microSD	\$2.35	4	\$9.40
Memoria microSD 16GB clase 10	\$12.75	5	\$63.75
Módulo RTC DS3231	\$2.35	4	\$9.40
Módulo TP4056 cargador de baterías litio	\$7.12	2	\$14.24
Panasonic NCR 18650 3400mAh 3.7	\$12.45	7	\$87.15
Portabatería triple 18650 Li-ion	\$8.67	1	\$8.67
Baterías CR2032	\$1.00	4	\$4.00
Pines hembra para soldar	\$0.15	45	\$6.75
Cable 22 AWG Hookup	\$0.40	5	\$2.00
Perno estufa 2.5x25mm	\$0.14	20	\$2.80
Toma superficial hembra	\$1.70	2	\$3.40
Toma hembra polarizado	\$1.30	1	\$1.30
Caja rectangular PVC	\$0.80	1	\$0.80
Cable duplex	\$1.15	30	\$34.50
Perno estufa 2.5x20mm con tuerca	\$0.35	25	\$8.75
Conecto USB hembra	\$0.69	6	\$4.14
PCB acabado profesional	\$5.65	10	\$56.50
Power bank 2500 mAh	\$8.25	5	\$41.25
Case acrílico verde transparente	\$24.65	1	\$24.65
Cargadores 5V 2A	\$6.23	5	\$31.15
Cargador 5V 3A	\$7.55	1	\$7.55
Cable USB macho a USB macho 1.5 m	\$2.35	6	\$14.10
Cable USB macho a microUSB macho 1 m	\$1.95	1	\$1.95
Total			\$757.59

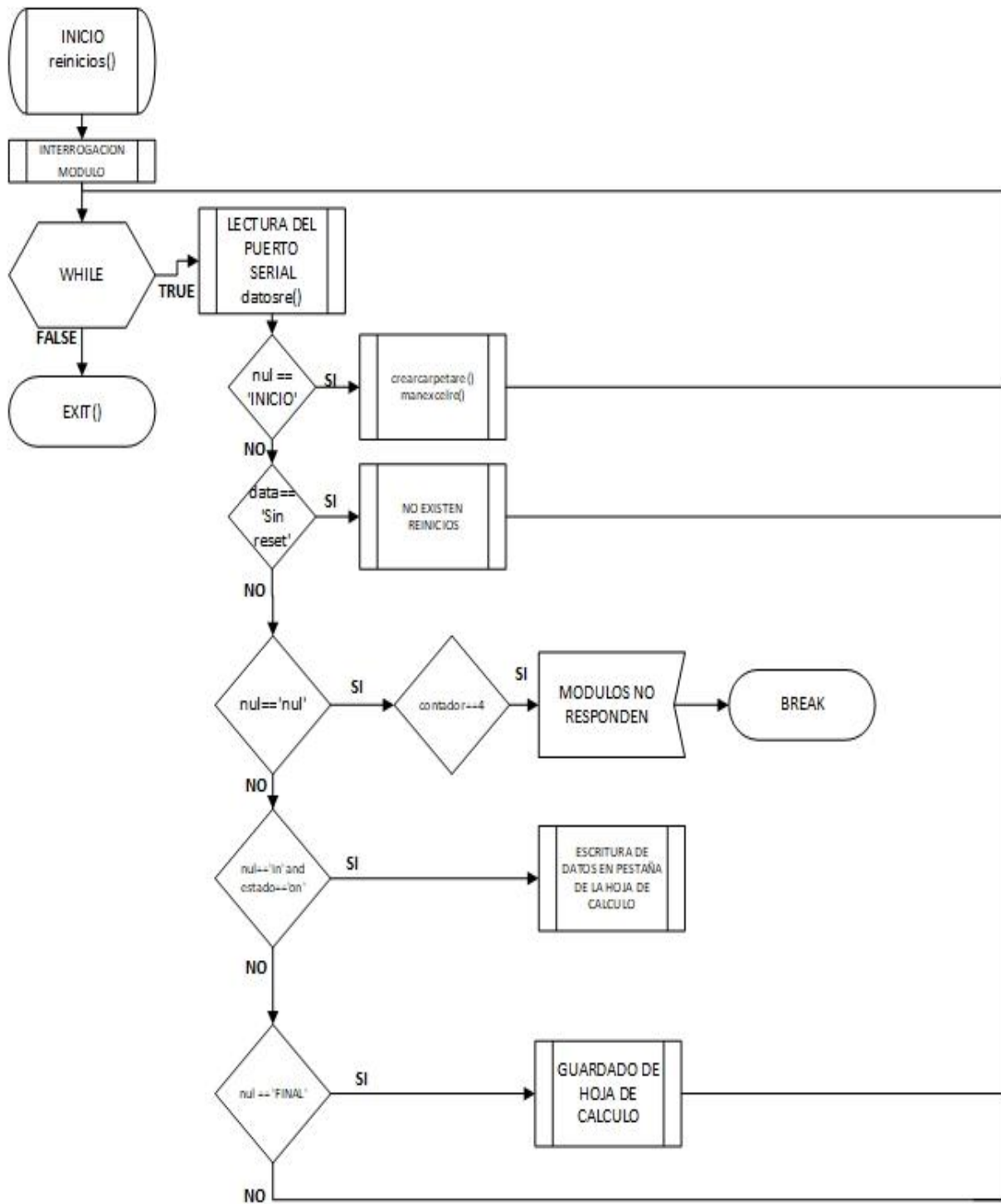
Anexo II: Diagrama de flujo del algoritmo de ejecución en cada nodo sensor.



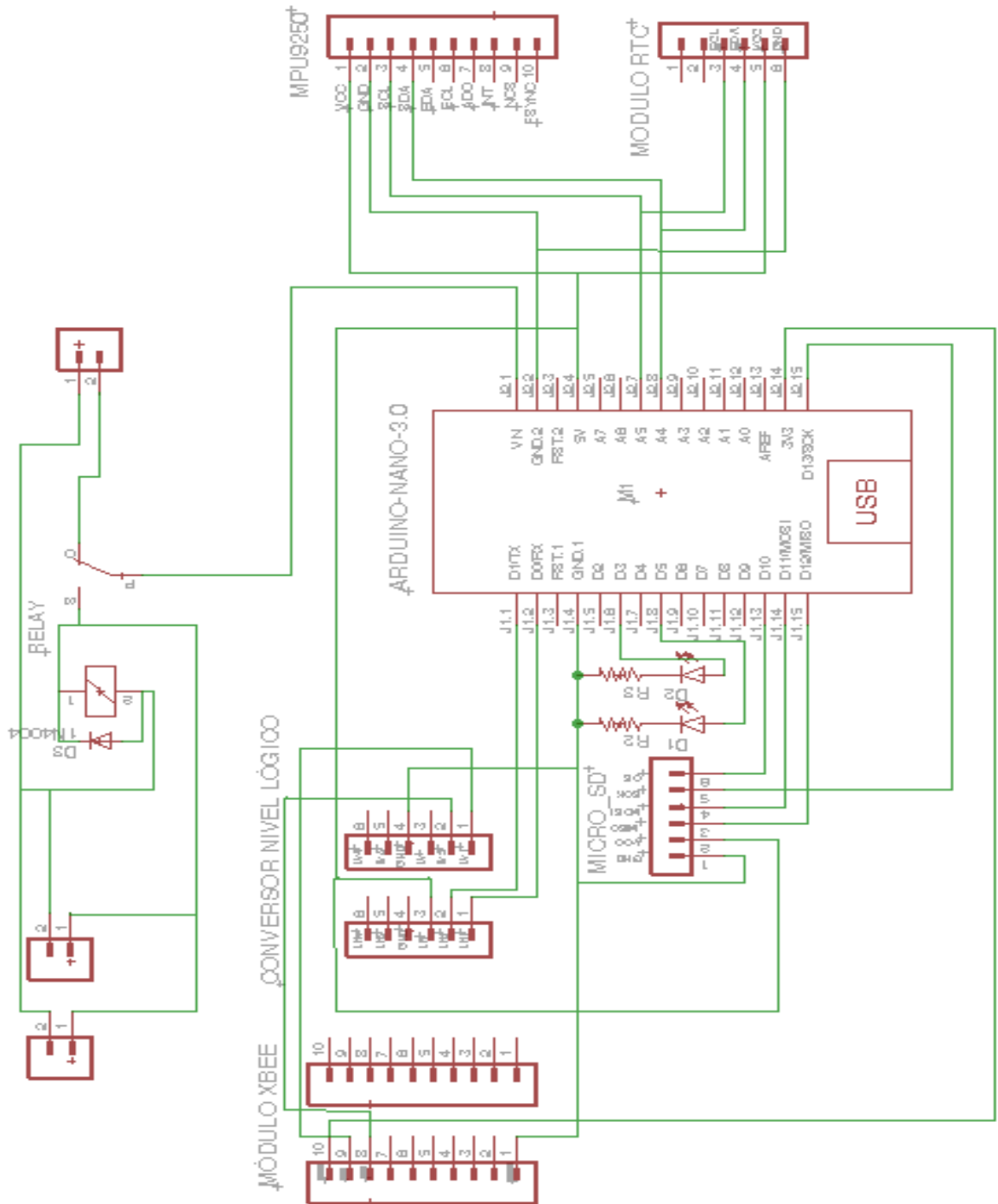
Anexo III: Diagrama de flujo del algoritmo de ejecución de los códigos en Python.







Anexo IV: Diagrama de conexión del nodo sensor del sistema de adquisición de vibraciones



Anexo V: Glosario.

8

802.11

Es un estándar que define el uso de los dos niveles inferiores de la arquitectura o modelo OSI (capa física y capa de enlace de datos), especificando las normas de funcionamiento de una red de área local inalámbrica (WLAN). 6, 23

A

Acelerómetro

Un acelerómetro es un sensor que sirve para medir la fuerza de aceleración, ya sea estática o dinámica, estos sensores son útiles para medir vibraciones y movimientos en un sistema. 37, 38, 39, 53, 76

Algoritmo

Es un conjunto prescrito de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permiten llevar a cabo una actividad mediante pasos sucesivos que no generen dudas a quien deba hacer dicha actividad. 13, 14, 16, 51

Amplitud

Es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasiperiódicamente en el tiempo. Es la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio. 1, 7

Ancho de banda

Es la medida de datos y recursos de comunicación disponible o consumida expresados en bit/s o en sus múltiplos 14, 15

Antena

Es un dispositivo (conductor metálico) usado para las transmisiones en frecuencias AM o FM, diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Una antena transmisora transforma energía eléctrica en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa. 10, 21, 22

B

Bit

Es la unidad mínima de información empleada en informática, en cualquier dispositivo digital, o en la teoría de la información. 14, 15, 17, 21, 24, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 37, 41

Bus

Es un sistema digital que transfiere datos entre los componentes de una dispositivo electrónico o entre varios. 38, 39, 40, 41

Bytes

Es la unidad de información de base utilizada en computación y en telecomunicaciones, y que resulta equivalente a un conjunto ordenado de ocho bits. 17, 29, 31, 32

C

Canal

Corresponde a una porción o intervalo de frecuencias del espectro radioeléctrico. 10, 11, 15, 16, 18, 24, 25, 33, 35, 36

D

Desplazamiento

Es el vector que define la posición de un punto o partícula en relación a un origen A con respecto a una posición B. 3, 8, 67

E

Enrutamiento

Es la función de buscar un camino entre todos los posibles en una red de paquetes cuyas topologías poseen una gran conectividad. i, 12, 13, 14, 16

Estándar

Son acuerdos documentados que contienen especificaciones técnicas u otros criterios precisos para ser usados consistentemente como reglas, guías o definiciones de características para asegurar que los materiales, productos, procesos y servicios cumplan con su propósito. 1, 10, 12, 14, 15, 16, 19, 22, 39, 40, 48

F

Frecuencia

Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. 1, 7, 9, 10, 11, 18, 39

Firmware

Es un programa informático que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo. 20, 28, 35

G

Giroscopio

Es un dispositivo mecánico que sirve para medir, mantener o cambiar la orientación en el espacio de algún aparato o vehículo. vi, 37, 38, 39, 66, 67, 68, 69, 76

H

Hardware

Se refiere a las partes físicas, tangibles, de un sistema informático. 19, 20

Hash

Tiene como propósito principal detectar cambios accidentales en una secuencia de datos para proteger la integridad de estos, verificando que no haya discrepancias entre los valores obtenidos al hacer una comprobación inicial y otra final tras la transmisión. 29, 30

L

Latencia

Es la suma de retardos temporales dentro de una red. Un retardo es producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red. 10, 23, 33

M

Magnitud

Es una propiedad medible de un sistema físico, es decir, a la que se le pueden asignar distintos valores como resultado de una medición o una relación de medidas. v, 4, 5, 7, 67, 68, 69

Microcontrolador

Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. iii, vi, 19, 24, 34, 37, 39, 42, 43, 49, 51

Magnetómetro

Dispositivos que sirven para cuantificar en fuerza o dirección la señal magnética de una muestra..... 37, 38, 39

Modelo OSI

Marco de referencia para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones. Es un lineamiento funcional para tareas de comunicaciones y, por consiguiente, no especifica un estándar de comunicación para dichas tareas. 10, 14

N

Nodo

Es un punto de intersección, conexión o unión de varios elementos que confluyen en el mismo lugar. 1, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 23, 24, 42, 51, 53, 54, 72

O

Ortogonales

Es un adjetivo que se emplea para nombrar a aquello que se encuentra en un ángulo de 90°. Se trata de una noción que, en el caso de los espacios euclídeos, es equivalente al concepto de perpendicularidad. 8, 51

P

Paquete

Es cada uno de los bloques en que se divide la información para enviar, en el nivel de red. ... iv, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 33

Protocolo

Es un sistema de reglas que permiten que dos o más entidades de un sistema de comunicación se comuniquen entre ellas para transmitir información por medio de cualquier tipo de variación de una magnitud física. Se trata de las reglas o el estándar que define la sintaxis, semántica y sincronización de la comunicación, así como también los posibles métodos de recuperación de errores...i, ii, iv, 1, 2, 6, 10, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 27, 33, 43, 51, 53, 72

Puerto serie

Es una interfaz de comunicaciones de datos digitales, frecuentemente utilizado por computadoras y periféricos, donde la información es transmitida bit a bit, enviando un solo bit a la vez..... 24, 35

R

Red

Es un conjunto de equipos nodos y software conectados entre sí por medio de dispositivos físicos o inalámbricos que envían y reciben impulsos eléctricos, ondas electromagnéticas o cualquier otro medio para el transporte de datos, con la finalidad de compartir información, recursos y ofrecer servicios. ... ii, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 33, 41, 53, 54, 72

Radiofrecuencia

También denominado espectro de radiofrecuencia, es un término que se aplica a la porción menos energética del espectro electromagnético, situada entre los 3 hercios (Hz) y 300 gigahercios (GHz)..... 1, 19, 51, 55

T

Telemetría

Es una tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia el operador del sistema..... 3

Topología

Se define como el mapa físico o lógico de una red para intercambiar datos. En otras palabras, es la forma en que está diseñada la red, sea en el plano físico o lógico. .. 9, 11, 12, 13, 18, 22, 23, 54

Trama

Es una unidad de envío de datos. Es una serie sucesiva de bits, organizados en forma cíclica, que transportan información y que permiten en la recepción extraer esta información.... ii, iv, 17, 18, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 72

V

Vibraciones

Es la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio)..... i, v, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 37, 42, 51, 52, 54, 58, 72, 74

Velocidad

Es una magnitud física de carácter vectorial que relaciona el cambio de posición (o desplazamiento) con el tiempo. vi, 3, 8, 9, 10, 22, 37, 39, 40, 51, 53, 65, 67

Anexo VI: Manual de usuario para interfaz gráfica.

En la primera ventana nombrada como ‘ventana de bienvenida’ oprimiremos el botón “siguiente” para avanzar a la siguiente ventana, tal como se observa en la Ilustración 1.

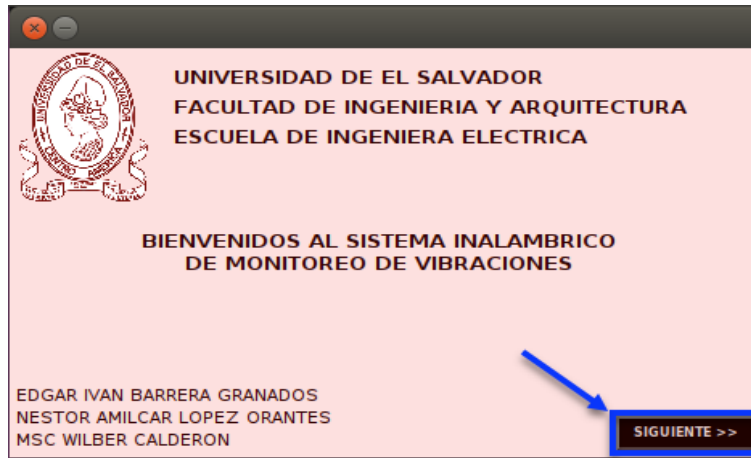


Ilustración 1 de manual de usuario – Ventana de bienvenida

La ventana siguiente que se muestra en la Ilustración 2 es la ‘ventana de tareas’ que proporciona el acceso a las tareas del sistema mediante los botones presentados.



Ilustración 2 de manual de usuario – Ventana de tareas

Los botones de la ventana nos proporcionan información general de las funciones de cada uno de ellos, al posarnos sobre cada uno de ellos se despliega un pequeño mensaje con el texto, como se observa en la Ilustración 3 del manual.



Ilustración 3 de manual de usuario – Información de botones

Si necesitamos conocer el estado de los dispositivos albergados conectados al sistema, debemos dar click en el botón ‘Información del sistema’, como se aprecia en la Ilustración 4, que nos presentara una nueva ventana.



Ilustración 4 de manual de usuario – Botón Información del sistema

Para conocer la función de cada uno de los dispositivos al hacer click sobre el nombre de interés se desplegará un mensaje describiendo la función, tal como se muestra en la Ilustración 5.



Ilustración 5 de manual de usuario –Función de los dispositivos

Al hacer click sobre cualquiera de las imágenes marcadas podemos obtener el estado de cada dispositivo obteniendo mediante un mensaje despegable, como se observa en la Ilustración 6.



Ilustración 6 de manual de usuario –Estado de los dispositivos

De igual manera podemos obtener esta misma función mediante los botones en la barra de menú resaltados en la Ilustración 7.



Ilustración 7 de manual de usuario –Estado de los dispositivos mediante barra menú

Para regresar a la ‘ventana de tareas’ bastara con hacer click en el botón de ‘regresar’.



Ilustración 7 de manual de usuario – Botón regresar ventana información

Si necesitamos realizar la programación de la tarea de recolección de datos de manera automática lo haremos mediante el botón ‘Programación automática’ de la ventana de tareas, como se muestra en la Ilustración 8.



Ilustración 8 de manual de usuario – Botón Programación automática

Al oprimir este botón obtenemos un nuevo espacio en la ventana, como se observa en la Ilustración 9, que nos permitirá la programación de la actividad en específico de acuerdo con nuestras necesidades, en la misma Ilustración observaremos diferentes campos que serán explicara a continuación.



Ilustración 9 de manual de usuario – Campos de la sección programación automática

El campo uno es un área que nos permite el ingreso de valores enteros para la programación de la tarea, para entender mejor los datos que se deben de ingresar podemos dar click en el botón de ayuda del campo 2, la ilustración 10 nos muestra el botón correspondiente y la ventana de ayuda que se obtiene.



Ilustración 10 de manual de usuario – Botón de ayuda y resultado

Se observa en la ilustración 11 los resultados al ingresar valores adecuados en los campos de fecha y hora del campo 1 de la ilustración 9, se tiene la tarea a ejecutarse en los valores establecidos por el usuario, caso contrario al ingresar valores incorrectos el usuario obtendrá un mensaje de advertencia y una recomendación.



Ilustración 11 de manual de usuario – Ingreso correcto e incorrecto de información

El botón regresar del campo dos de la ilustración 9 nos permite retornar a la ventana de tareas.

El botón ‘Sistema manual’ marcado en la ilustración 12 permite ejecutar tres tipos de tareas:



Ilustración 12 de manual de usuario – Botón Sistema manual

Botón ‘Captura de datos’: Realiza la adquisición de datos, solicita los datos a cada módulo sensor, el estado del proceso se puede observar mediante un recuadro, en la parte inferior, donde observaremos información textual de este, además una barra de estado nos indica que proceso aún se encuentra en ejecución, tal como se observa en la ilustración 13 historial de datos.



Ilustración 13 de manual de usuario – Botón Sistema manual

Una vez finalizada la adquisición, genera una carpeta y una hoja de cálculo correspondiente a la fecha y hora en que se inició el proceso paralelamente genera la hoja de cálculo que almacena todos los datos creando así un archivo, un ejemplo del archivo generado lo podemos observar en la ilustración 14.

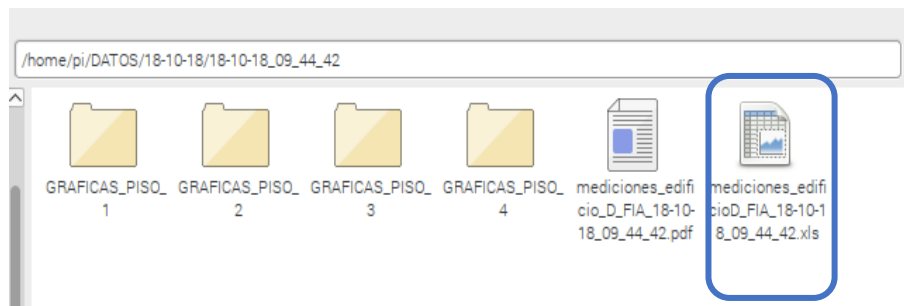


Ilustración 14 de manual de usuario – Archivo generado desde el Botón Capturar datos

Botón ‘Generar gráficos’: a partir de la hoja de cálculos obtenida con la tarea anterior, este botón genera gráficos de línea para la representación visual de los datos, tal como se muestra en la ilustración 15, se despliega un buscador que nos permite navegar por los directorios para la elección de la hoja de cálculo, la barra de estado nos indica que proceso aún se encuentra en ejecución.

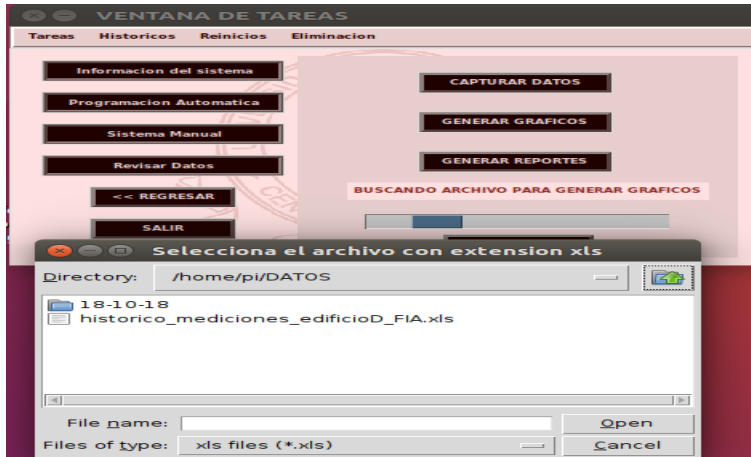


Ilustración 15 de manual de usuario – Búsqueda de hoja de cálculo para la elaboración de reportes
 Una vez finalizado este proceso, la ilustración 16 muestra las carpetas generadas mediante lenguaje Python que contienen los gráficos de los datos obtenidos de cada uno de los 4 pisos del edificio D de la facultad de Ingeniería y Arquitectura.



Ilustración 16 de manual de usuario – Gráficos obtenidos

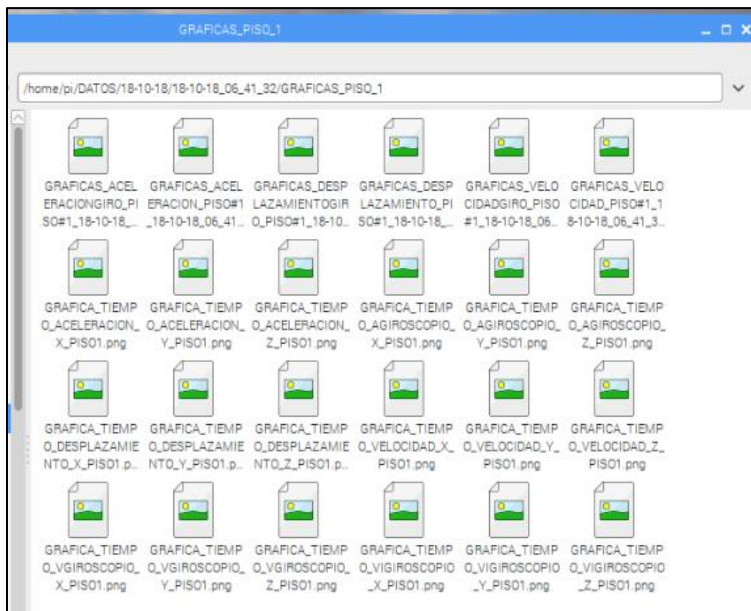


Ilustración 17 de manual de usuario – Contenido de una carpeta de gráficos

Botón ‘Generar reportes’: una vez obtenidos la hoja de cálculo con los datos adquiridos de los módulos sensores, este botón elabora un reporte en formato pdf que contiene los gráficos correspondientes a los datos de la hoja de cálculo, generar gráficos mediante la ejecución de la tarea del ítem anterior no es imprescindible para elaborar un reporte. La ilustración 18, se despliega un buscador que nos permite navegar por los directorios para la elección de la hoja de cálculo, la barra de estado nos indica que proceso aún se encuentra en ejecución.

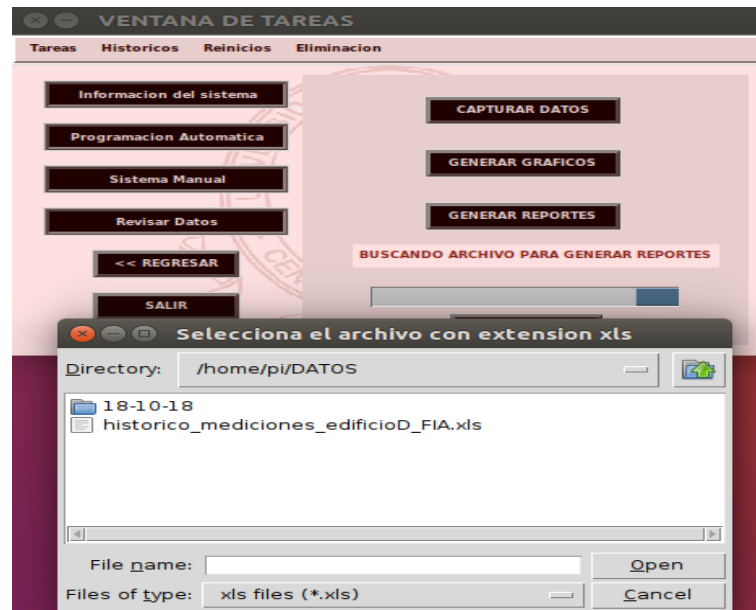


Ilustración 18 de manual de usuario – Búsqueda de hoja de cálculo para la elaboración de reportes

El resultado de este proceso devuelve un archivo en formato pdf, como por ejemplo el mostrado en la ilustración 19, el contenido de este reporte se muestra en la ilustración 20 y 21.

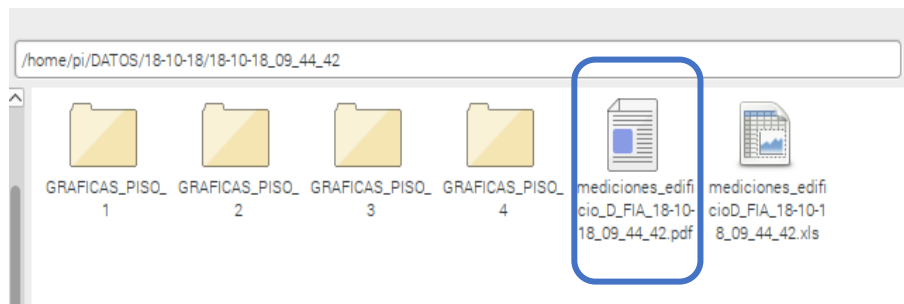


Ilustración 19 de manual de usuario – Reporte obtenido.

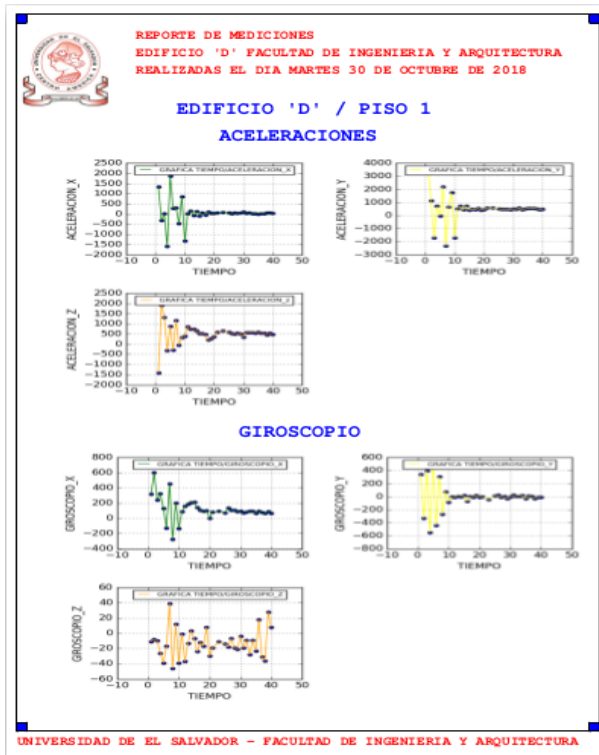


Ilustración 20 de manual de usuario – Contenido de reporte.

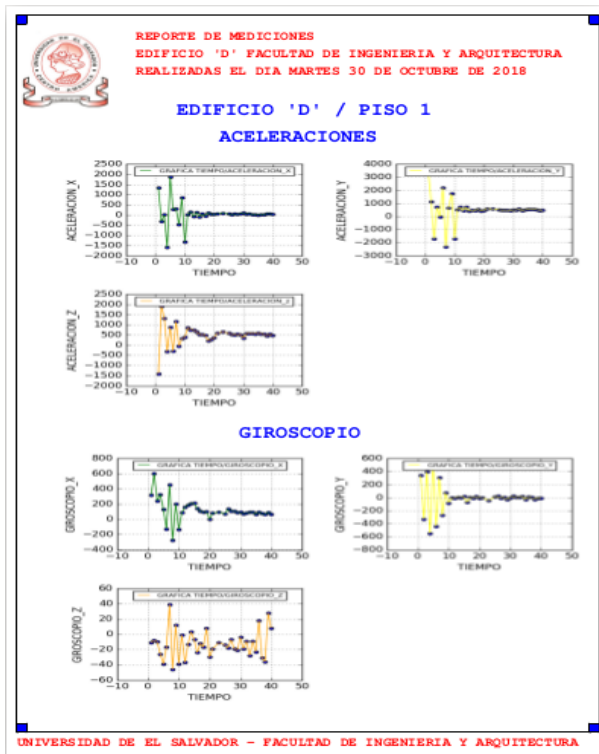


Ilustración 20 de manual de usuario – Contenido de reporte.

El botón ‘REGRESAR’ marcado en la ilustración 21 nos permite retornar a la ventana de tareas.



Ilustración 21 de manual de usuario – Botón regresar.

El botón ‘REVISAR DATOS’ marcado en la ilustración 22 permite chequear los resultados obtenidos de las tres anteriores tareas.



Ilustración 22 de manual de usuario – Botón Revisar Datos

En el nuevo campo obtenido tenemos tres funciones para chequear los datos obtenidos, generados y almacenados en la placa Raspberry Pi.

El botón ‘DATOS ALMACENADOS’ marcado en la figura 23, nos permite la revisión de hojas de cálculo generadas a partir de los datos obtenidos de los módulos XBee.

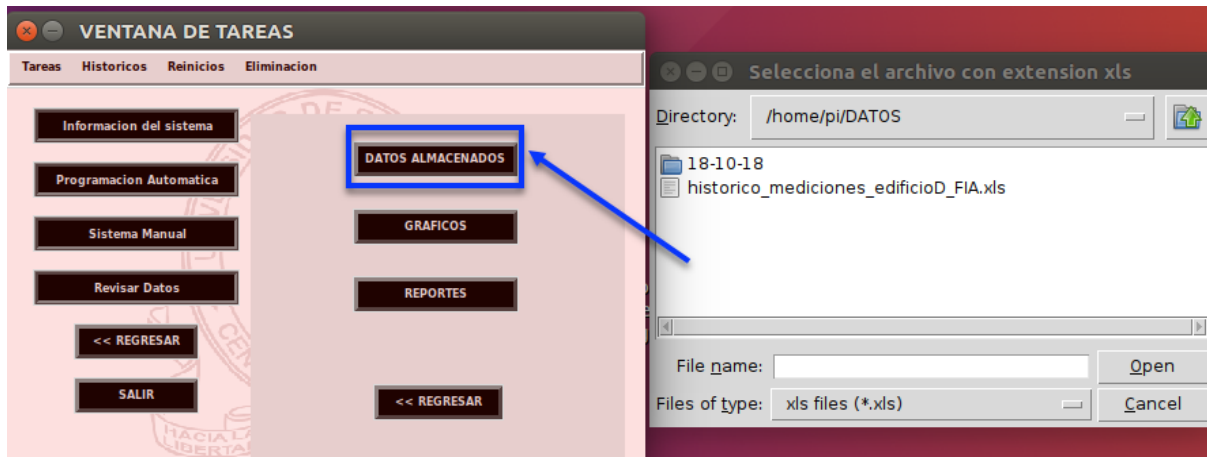


Ilustración 23 de manual de usuario – Revisión de hojas de cálculo.

El botón 'GRÁFICOS' marcado en la figura 24, nos permite la revisión de los gráficos generados anteriormente.

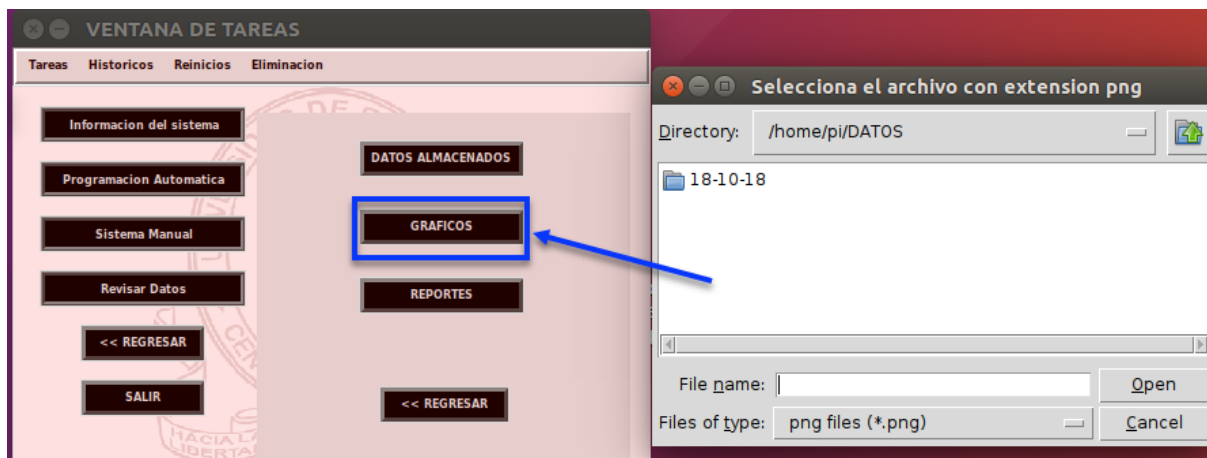


Ilustración 24 de manual de usuario – Revisión de graficos.

El botón 'REPORTES' marcado en la figura 25, nos permite la revisión de los reportes generados anteriormente.

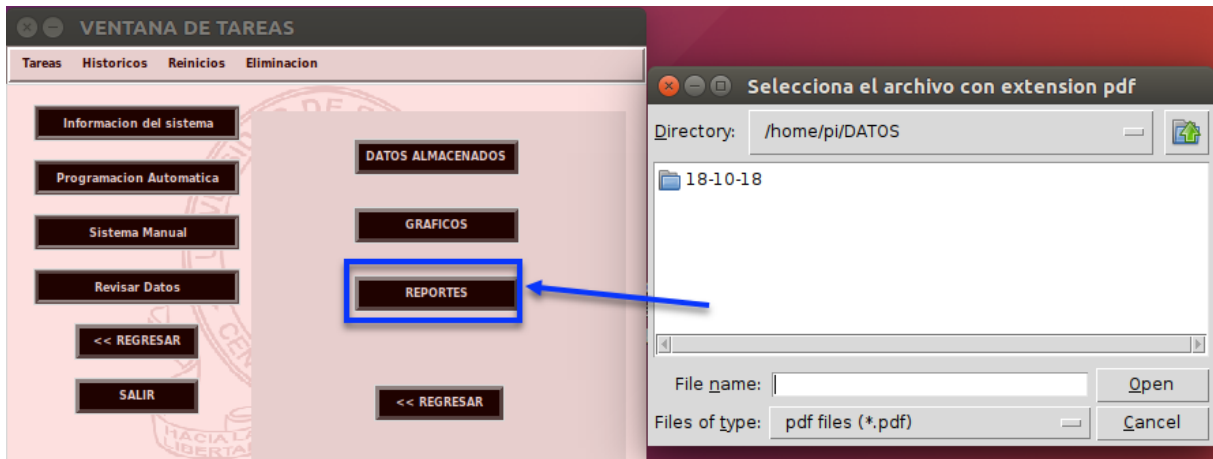


Ilustración 25 de manual de usuario – Revisión de reportes.

El botón 'REGRESAR' marcado en la ilustración 26 nos permite retornar a la ventana de tareas.



Ilustración 26 de manual de usuario – Botón regresar.

Además, en la ventana de tareas tenemos 4 elementos más de interés que son numerados en la ilustración 27.



Ilustración 27 de manual de usuario – Barra de menú.

La barra de menú de la ventana de tareas consta de cuatro botones con menús desplegables

- 1 ‘TAREAS’: Menú mostrado en la ilustración 28 que contiene los mismos procesos que se presentan en la ventana de tareas, cada uno de estos explicados anteriormente.



Ilustración 28 de manual de usuario – Botón Tareas de barra de menú.

- 2 ‘HISTÓRICOS’: Permite el acceso al archivo del histórico de datos que se actualiza cada vez que se realiza una recolección de datos desde los módulos. El menú se muestra en la ilustración 29.

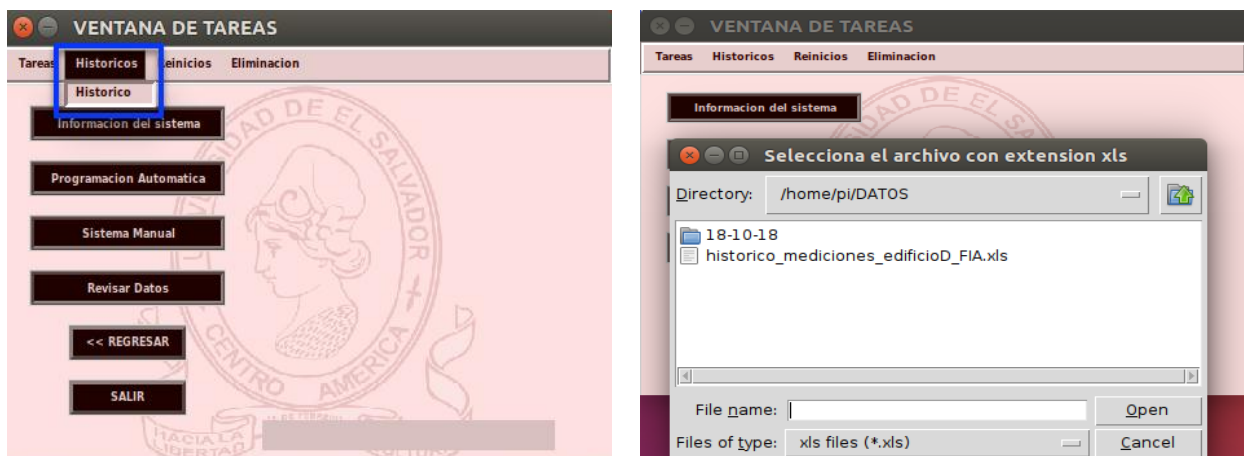


Ilustración 29 de manual de usuario – Botón Históricos de barra de menú.

- 3 ‘REINICIOS’: Este menú contiene dos acciones, la primera, solicitar a cada módulo sensor la cantidad de reinicios que ha tenido, la segunda, la tabulación de esta información. El submenú marcado en la ilustración 30 permite generar reportes de hojas de cálculo obtenidas en el siguiente submenú.

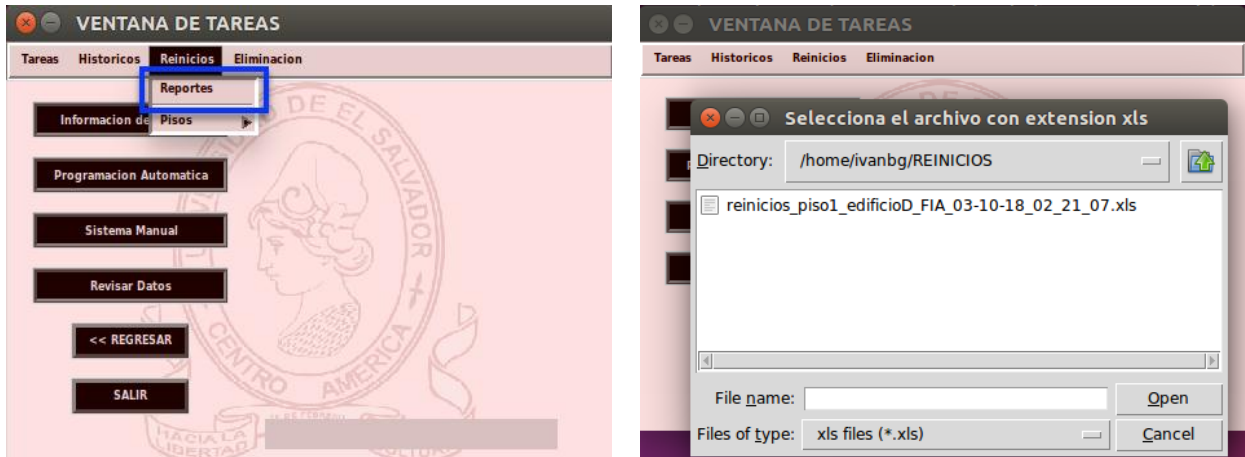


Ilustración 30 de manual de usuario – Botón Reinicios submenú Reportes de la barra de menú.

El submenú marcado en la ilustración 31 permite la consulta a los módulos XBee para la obtención de los reinicios sufridos por el dispositivo.



Ilustración 31 de manual de usuario – Botón Reinicios submenú Pisos de la barra de menú.

Los archivos generados por estos dos submenús los podemos observar en la ilustración 32.

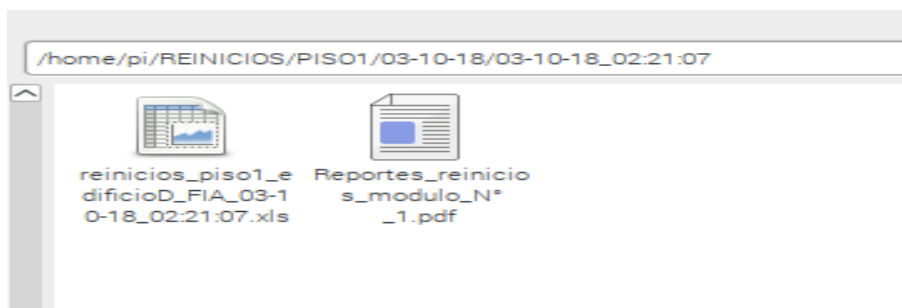


Ilustración 32 de manual de usuario – Hoja de cálculo y reporte obtenido por el menú reinicios

- 4 'ELIMINACIÓN': Permite la eliminación de datos de mediciones y de reinicios almacenados los submenús los podemos observar en la ilustración 33



Ilustración 33 de manual de usuario – Botón eliminación submenú Reinicios y Mediciones.

Para finalizar la función de los botones marcados en la ilustración 34 nos permiten regresar a la ventana de bienvenida y salir por completo de la interfaz gráfica.



Ilustración 34 de manual de usuario – Botón regresar ventana anterior y salir de la aplicación.