

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO
INALÁMBRICO DE PARÁMETROS DE ESTRUCTURAS CIVILES**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presentan los bachilleres:

Misely Katherine Ruiz Chávez
Arthur Francis Ramos Balcazar

ASESOR: Willy Eduardo Carrera Soria
CO-ASESOR: Rafael Aguilar Velez

Lima, Diciembre de 2014

RESUMEN

Debido al constante crecimiento en la construcción de estructuras, los sistemas de monitoreo estructural han tomado bastante importancia. Estos sistemas permiten obtener información de parámetros varios que acompañada de su respectivo análisis, se puede determinar los daños en una estructura y aplicar las medidas que crean convenientes.

El presente trabajo de tesis se basa en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo inalámbrico de parámetros de estructuras civiles, los cuales podrán ser visualizados en una interfaz de usuario en tiempo real. Este sistema contará con tres módulos de medición, un módulo coordinador y una computadora, con los que se probará el principio de funcionamiento para la adquisición, procesamiento y visualización de los parámetros de interés.

Para el análisis de las estructuras, es necesario conocer tres parámetros importantes: la magnitud de las vibraciones a las que están sometidas y la humedad y la temperatura a las que se hacen estas mediciones. Para esto, se seleccionó un acelerómetro digital que estará presente en cada uno de los módulos de medición y un sensor ambiental digital que es necesario solo en uno de estos, ya que los parámetros ambientales no presentan grandes cambios en una misma estructura.

Una vez realizado el montaje de los módulos de medición en distintos puntos de la estructura, estos inician la adquisición de los parámetros estructurales y los envían hacia el módulo coordinador cada vez que este último hace la petición. Para este fin, se utiliza una red de sensores en configuración punto-multipunto conformada por módulos Xbee. Luego, el módulo coordinador se comunica con la computadora utilizando una tarjeta para el acondicionamiento de nivel de voltaje mediante un puerto USB de la misma. Toda la información recibida es procesada para asignar las mediciones a los módulos de medición correspondiente y obtener las magnitudes reales. Los parámetros de interés podrán ser visualizados en tiempo real en la interfaz implementada, con la cual el usuario también podrá controlar el inicio y fin del proceso de monitoreo.

En el capítulo 1, se explican conceptos generales sobre el monitoreo estructural y cómo fue su evolución tecnológica; asimismo, se describen algunos equipos comerciales. En el capítulo 2, se aborda el marco problemático y los objetivos del presente trabajo de tesis. En el capítulo 3, se desarrolla el diseño e implementación del sistema de monitoreo estructural. Finalmente, en el capítulo 4, se describen los ensayos realizados y se muestran los resultados del sistema implementado.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo Inalámbrico de Parámetros de Estructuras Civiles
 Área : Electrónica # 1238
 Asesor : Ing. Willy Carrera Soria / Ph.D. Rafael Aguilar Veloz
 Alumno : Misely Katherine Ruiz Chávez / Arthur Francis Ramos Balcazar
 Código : 20084301 / 20090451
 Fecha : 06/10/2014

**Descripción y Objetivos**

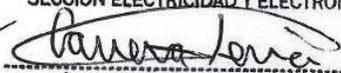
Los sistemas de monitoreo estructural se aplican para el control de la seguridad, integridad y rendimiento de una estructura haciendo uso de métodos no invasivos para la adquisición de parámetros específicos, los cuales son necesarios para la detección de algún daño ocasionado como consecuencia de factores externos.

Los primeros sistemas de monitoreo estructural utilizaban sensores piezoeléctricos y tecnologías de comunicación cableada. Sin embargo, algunos sistemas actuales integran módulos de sensado con capacidad de procesamiento y sincronización, comunicación inalámbrica e interfaz de usuario para visualización de parámetros en tiempo real, pero su costo es bastante elevado.

En lo que respecta a Perú, los sistemas de monitoreo estructural se venden como un servicio brindado por empresas que utilizan productos importados.

El objetivo general de la tesis es diseñar e implementar un sistema de monitoreo inalámbrico de parámetros de estructuras civiles que permita el análisis de su comportamiento y la visualización respectiva en tiempo real en el monitor de una computadora.

Como objetivos específicos tenemos: -Diseñar e implementar el sistema de sensado para las vibraciones de la estructura, y para la temperatura y humedad del ambiente en el que se encuentra la estructura; -Diseñar e implementar el protocolo de comunicación inalámbrico entre los módulos de medición y el módulo coordinador; -Diseñar e implementar una interfaz para la comunicación entre el módulo coordinador y la PC; -Diseñar una interfaz gráfica de usuario que permita la visualización de los parámetros en tiempo real; y - Diseñar e implementar la fuente de alimentación del sistema.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATANO SANCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 80 PÁGINAS



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo Inalámbrico de Parámetros de Estructuras Civiles

Índice

Introducción

- | | |
|---|---------------------------|
| 1. Aspectos Teóricos del Monitoreo Estructural | Misely Ruiz/ Arthur Ramos |
| 2. Problemática Actual del Monitoreo Estructural | Misely Ruiz/ Arthur Ramos |
| 3. Diseño e Implementación del Sistema de Monitoreo Estructural | Misely Ruiz/ Arthur Ramos |
| 4. Ensayos | Misely Ruiz/ Arthur Ramos |

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

MÁXIMO 80 PÁGINAS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA


Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA


M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATAÑO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



JUSTIFICACIÓN DE TEMA DE TESIS ENTRE DOS PERSONAS

El presente trabajo ha sido realizado por dos tesisistas debido al tiempo necesario para su elaboración, el cual se muestra a continuación:

Tesisista	Misely Ruiz	Arthur Ramos
Aspectos Teóricos del Monitoreo Estructural		
• Definiciones Básicas	100	0
• Estado del Arte	0	100
Problemática Actual del Monitoreo Estructural		
• Explicación	30	0
• Objetivos	0	30
Diseño e Implementación del Sistema de Monitoreo Estructural		
• Metodología	30	30
• Selección de sensores	80	0
• Selección de módulo de comunicación	60	0
• Selección de unidad de procesamiento	0	40
• Selección de fuente de alimentación	0	50
• Diseño e implementación de circuitos electrónicos	200	0
• Desarrollo del software	0	250
Pruebas y Resultados	50	50
TOTAL DE HORAS	550	550

MÁXIMO 80 PÁGINAS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ÁNGEL CATANO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



ÍNDICE

CAPÍTULO 1: ASPECTOS TEÓRICOS DEL MONITOREO ESTRUCTURAL	2
1.1. Monitoreo Estructural	2
1.2. Evolución de la Tecnología de Monitoreo Estructural	7
1.3. Equipos Comerciales	8
1.4. Tecnologías de Comunicación Inalámbrica	11
1.5. Síntesis	12
CAPÍTULO 2: PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL MONITOREO ESTRUCTURAL	13
2.1. Variables Internas	13
2.2. Marco Problemático	15
2.3. Objetivos de la Tesis	16
CAPÍTULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO ESTRUCTURAL INALÁMBRICO	17
3.1. Diagrama de Bloques	17
3.2. Etapa de Sensores	19
3.2.1. Sensor de Aceleración	19
3.2.2. Sensor Ambiental	22
3.3. Etapa de Comunicación	23
3.4. Etapa Coordinador/Interfaz	26
3.4.1. Módulo Coordinador	26
3.4.2. Interfaz con la Computadora	26
3.5. Etapa de Control	28
3.6. Etapa de Alimentación	38
3.7. Etapa de Procesamiento e Interfaz de Usuario	42
CAPÍTULO 4: ENSAYOS	49
4.1. Ensayos de la Etapa de Sensores	49
4.1.1. Ensayo del Acelerómetro	49
4.1.2. Ensayo de Sensor Ambiental	53
4.2. Ensayos de la Etapa de Comunicación Inalámbrica	55
4.2.1. Prueba de conectividad	55

4.2.2 Prueba de velocidades	56
4.2.3 Prueba de distancia	58
4.3. Ensayo de la Etapa de Control	59
4.4. Ensayos de Procesamiento	60
4.4.1. Procesamiento de la aceleración	61
4.4.2. Procesamiento de los parámetros ambientales.....	63
4.4.3. Sincronización	63
4.5. Ensayos del Sistema Completo	65
CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA	71



INTRODUCCIÓN

Existen diversas tecnologías para el análisis de estructuras civiles que principalmente están conformadas por sensores de parámetros específicos. Estas tecnologías permiten adquirir información importante para la detección de daños en las estructuras, los cuales pueden ser originados por distintos factores tales como vientos, terremotos, alto tránsito, entre otros. De esta manera, se pueden tomar las medidas necesarias para su mantenimiento y evitar así algún desastre. El proceso de adquisición y análisis de parámetros de las estructuras tiene el nombre de Monitoreo Estructural o Monitoreo de Salud Estructural (SHM: Structural Health Monitoring).

Se tienen varias empresas que ofrecen tecnologías para sistemas de monitoreo estructural, las cuales integran soluciones con módulos de medición para adquirir los parámetros de interés en distintos puntos de una estructura. Sin embargo, estas soluciones utilizan equipos importados con amplias funcionalidades que presentan costos muy elevados. Asimismo, muchas de estas tecnologías se comunican de forma cableada, lo cual genera un costo adicional de materiales e instalación, y problemas de portabilidad.

Por otro lado, también se tienen tecnologías que le dan una solución al problema de portabilidad mencionado en el párrafo anterior. Estas utilizan protocolos de comunicación inalámbrica entre los módulos de medición y un equipo para la adquisición y el procesamiento de la información. La sincronización en la adquisición de los parámetros resulta ser un inconveniente, ya que es necesario que la toma de datos se haga en el mismo instante de tiempo.

El presente documento se centrará en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo inalámbrico de parámetros estructurales, para ser mostrados en una interfaz de usuario en una computadora en tiempo real. Los parámetros de interés son: temperatura, humedad y aceleración. Este sistema medirá las vibraciones en distintos puntos de una estructura y las condiciones ambientales bajo las cuales se hace la medición, lo cual podrá visualizarse en una interfaz amigable. De esta manera, brindará información necesaria para que los especialistas puedan realizar el análisis e interpretación correspondiente.

CAPÍTULO 1

Aspectos Teóricos del Monitoreo Estructural

1.1. Monitoreo Estructural

1.1.1. Descripción

Actualmente, existen distintos tipos de estructuras creadas por la Ingeniería, tales como puentes, edificio, túneles, entre otros. Gracias al avance de la tecnología, la calidad de estas estructuras ha ido mejorando a lo largo del tiempo. Sin embargo, toda estructura está sometida a agentes externos que pueden dañarla y son originadas por factores naturales (vientos, terremotos, factores ambientales) o factores humanos (alto tránsito, mal mantenimiento). Si estos daños no son detectados a tiempo, pueden llegar a ser irreversibles.

Debido a esto, se utilizan sistemas de monitoreo estructural que permiten adquirir parámetros necesarios para poder prever la situación antes mencionada. Además, permiten analizar y comprender el comportamiento de los diferentes tipos de estructuras. De esta manera, se recopila información que sirve como consideraciones para trabajos futuros en este campo.

Los sistemas de monitoreo estructural usados actualmente son de una muy alta precisión y sensibilidad. Esto hace que los resultados obtenidos sean bastante adecuados y permiten un buen estudio de las estructuras. Además, todos los equipos están conectados por cables. Sin embargo, esto hace que los equipos utilizados y los costos por instalación sean muy caros y esto no lo hace accesible para todos.

1.1.2. Conceptualizaciones Generales

Se aprecia en la tabla 1.1 conceptualizaciones que facilitarán el entendimiento de la presente tesis.

Tabla 1.1: Conceptualizaciones Generales

Sistema de Monitoreo Estructural	Definición	Tecnología que consiste en analizar los datos de una estructura obtenidos mediante una red de sensores, con lo cual se puede estimar daños y detectar anomalías. [1]	
	Estructura	Definición	Objeto de estudio del monitoreo estructural. Es un ensamblaje de elementos que mantiene su forma y unidad. Algunos ejemplos son: puentes, edificios, estadios, edificaciones valiosas antiguas, etc.[1]
		Parámetros Estructurales	Datos obtenidos de la estructura asociada a distintos cambios químicos, en el ambiente o en las propiedades físicas. Algunos ejemplos son: humedad, aceleración, desplazamientos, deformaciones, etc.[1]

Sistema de Monitoreo Estructural	Sensor	Definición	Dispositivo capaz de convertir una magnitud física en una señal que puede ser leída por algún instrumento o un observador. Los sensores electrónicos son pequeños y alimentados por baterías o alguna fuente de alimentación a baja tensión. [2]
		MEMS	Sistemas integrados que trabajan en una escala en rango micro. Posee una parte eléctrica para actuación y detección, o electrónica para amplificación, filtrado y control. Además, requiere de un mecanismo mecánico para el movimiento y acción de su sistema interno. [3]
		Motes	Dispositivo de sensado autónomo y compacto con la capacidad de procesamiento y comunicación inalámbrica. Pueden formar redes llamadas WSN, en las que estos pueden cooperar entre ellos [4].
	Conversor Análogo-Digital	Definición	Dispositivo que convierte datos analógicos en datos discretos mediante un proceso de muestreo y retención, cuantización y codificación.

<p>Sistema de Monitoreo Estructural</p>	<p>Comunicación</p>	<p>Red Inalámbrica</p>	<p>Es una conexión de distintos nodos a través de ondas electromagnéticas, sin necesidad de un medio físico (cables). Fue implementada para eliminar las restricciones de movilidad de los sistemas cableados, permitiendo así la portabilidad en el mundo de la computación. [5]</p>	
		<p>Red Inalámbrica de Sensores</p>	<p>También llamada WSN, siglas para Wireless Sensor Networks. Es una red de dispositivos (nodos) que pueden hacer mediciones del ambiente y enviar la información adquirida mediante enlaces inalámbricos. [6]</p>	
		<p>Especificación de Estándar de Comunicación Inalámbrica</p>	<p>Definición</p>	<p>Documento técnico oficial donde están establecidos todas las características, materiales y servicios para la producción de componentes para aplicaciones de comunicación inalámbrica. Además, incluyen procedimientos para medir su calidad.</p>

Sistema de Monitoreo Estructural	Comunicación	Especificación de Estándar de Comunicación Inalámbrica	Wi-Fi	Especificación basada en el estándar IEEE 802.11. Es ampliamente utilizada en aplicaciones donde se requiere conectar a Internet o crear redes locales para el intercambio de información hasta en 32 dispositivos. Además, posee alta seguridad y gran ancho de banda, permitiendo intercambiar grandes cantidades de información hasta una tasa de 54Mbps. [7]
			ZigBee	Especificación basada en el estándar IEEE 802.15.4. Está orientado a aplicaciones de bajo costo y consumo, como es el caso de las redes de sensores y la automatización de viviendas. Permite enviar pequeños paquetes de información en una red grande, con conexiones entre dispositivos electrónicos en un rango de 10 a 75m. Globalmente, trabaja en la banda de 2.4GHz y puede alcanzar tasas de transferencia de hasta 250Mbps. [8]
	Interfaz de Usuario	Definición	Parte del sistema en el que el usuario entra en contacto física y cognitivamente con la máquina, es decir, donde hay un intercambio de información entre el usuario y la computadora. [9]	

Elaboración: Propia

1.2. Evolución de la Tecnología de Monitoreo Estructural

La instrumentación estructural es una rama de la Ingeniería Civil encargada del estudio de parámetros de estructuras para analizar y comprender su comportamiento. Normalmente, esta rama es aplicada en estructuras, tales como puentes y túneles, donde se utilizan sistemas de monitoreo estructural. Entre sus aplicaciones se tienen las siguientes:

- Validar y calibrar modelos analíticos.
- Estimar niveles de daño.
- Determinación de propiedades y comportamiento de un sistema estructural (rigidez, aceleración, desplazamiento, etc.) [10]

El equipo convencional utilizado consta de sensores de medición de vibraciones del tipo piezoeléctricos y un equipo de adquisición de datos, todo conectado mediante cables. Estos equipos constan de alta sensibilidad y resolución, lo cual permite obtener los resultados necesarios para un correcto análisis de la estructura. Por otro lado, ocasiona altos costos de instalación y problemas de mantenimiento [1].

Luego, el desarrollo de sensores se orientó a la creación de mecanismos autónomos, más pequeños y fáciles de manejar. Estos se llamaron MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Gracias a la efectividad en su proceso de fabricación, estos sensores permiten hacer mediciones de alta precisión a un relativo bajo costo y bajo consumo de potencia. Además, en los sistemas de monitoreo estructural, deben ser capaces de operar con normalidad aun cuando estén sometidos a altos niveles de vibración. [1] [11]

Asimismo, se comenzó a utilizar la tecnología inalámbrica por temas de flexibilidad y portabilidad para enfrentar el problema del cableado, logrando así reducir costos y tiempo de instalación. Sin embargo, la sincronización de la adquisición del sistema resultó ser un inconveniente, ya que es necesario que la toma de datos se haga en un tiempo exacto, es decir, con una muy poca variación de tiempo entre las distintas tomas de los módulos. [12]

Actualmente se han desarrollado sistemas de monitoreo en base el concepto de “motes”. Un “mote” es un sensor autónomo con la capacidad de procesamiento y comunicación inalámbrica. Una de sus ventajas es que pueden formar redes que les permiten cooperar entre sí llamadas WSN (Wireless Sensor Networks). [1]

1.3. Equipos Comerciales

Brüel & Kjær

Esta empresa brinda equipos especializados para el monitoreo estructural, sin embargo, no como un sistema integral, sino que el usuario debe seleccionar los equipos a utilizar. Para la etapa de sensado, tiene una amplia variedad de acelerómetros piezoeléctricos de alta sensibilidad y costos muy elevados. Por ejemplo, en la figura 1.1, se tiene el modelo 4383, que posee 31pC/g de sensibilidad y opera en el rango de frecuencias de 0.1 a 8400Hz. [13]



Figura 1.1: Acelerómetro piezoeléctrico modelo 4383

Adicionalmente, ofrece equipos analizadores de vibraciones que adquieren señales provenientes de los acelerómetros y las procesa a valores digitales, que serán integradas para su posterior análisis en una computadora. En la figura 1.2 se muestra el modelo 3160 que posee 4 canales de entrada, 2 canales de salida y puede procesar señales de hasta 50KHz. [14]



Figura 1.2: Analizador de vibraciones modelo 3160

Finalmente, brinda un software llamado “PULSE” (ver figura 1.3) que permite en tiempo real la visualización y análisis de los datos adquiridos en el dominio del tiempo y la frecuencia.



Figura 1.3: Software de análisis PULSE

Crossbow Technology

Esta empresa ofrece soluciones compuestas de tarjetas compatibles entre sí por familias, es decir, un grupo de tarjetas deben usarse necesariamente en conjunto para el correcto funcionamiento del sistema. Cada tarjeta cumple un rol diferente dentro del sistema de monitoreo estructural: sensado, comunicación e interfaz con la computadora. Sin embargo, estas soluciones no cuentan con un protocolo de sincronización para los datos, por lo cual debe ser desarrollado por el usuario.

A continuación, se mostrará 2 soluciones brindadas por la empresa Crossbow Technology. En la figura 1.4, se muestran la primera solución. Esta cuenta con 3 tarjetas: MICAz, tarjeta de comunicación inalámbrica (ver figura 1.4.a) [15], MTS420, tarjeta de sensado (ver figura 1.4.b) [16] y MIB520, tarjeta de interfaz con la computadora (ver figura 1.4.c) [17].

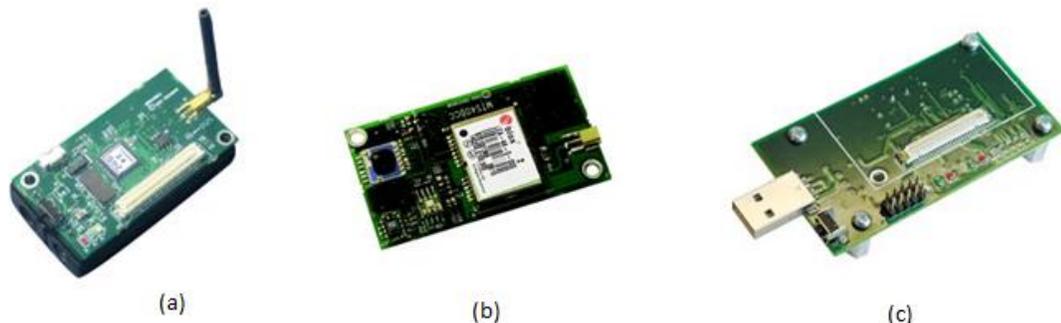


Figura 1.4: (a)MICAz, (b)MTS420, (c)MIB520

En la figura 1.5, se muestran la segunda solución. Esta cuenta con 3 tarjetas: Imote2, tarjeta de comunicación inalámbrica (ver figura 1.5.a)[18], ITS400, tarjeta de sensado (ver figura 1.5.b) [19] y IIB2400, tarjeta de interfaz con la computadora (ver figura 1.5.c) [20].

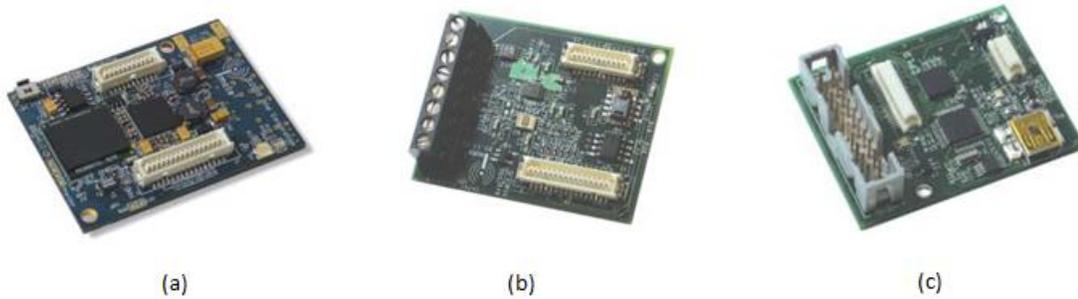


Figura 1.5: (a)Imote2, (b)ITS400, (c)IIB 2400

LORD MicroStrain Sensing Systems

Esta empresa brinda soluciones a través de módulos de medición (nodos), los cuales se comunican de manera inalámbrica con módems que sirven de interfaz con la computadora. Existe una mayor compatibilidad entre los dispositivos, ya que cada módulo mide un parámetro diferente (aceleración, temperatura, humedad, etc.). Además, los módems deben ser escogidos dependiendo del tipo de interfaz que se quiera hacer, ya sea con una computadora o un equipo DAQ. Otra característica bastante importante de esta solución es que los módulos de medición cuentan con su propio protocolo de sincronización.

A continuación, en la figura 1.6, se mostrará una solución brindada por la empresa LORD MicroStrain Sensing Systems. Esta solución cuenta con el módulo de medición G-Link-LXRS [21], nodo de medición inalámbrica de aceleración (Figura 1.6.a) y el módem inalámbrico WSDA-Base-104-LXRS [22], interfaz con la computadora vía puerto USB (figura 1.6.b).

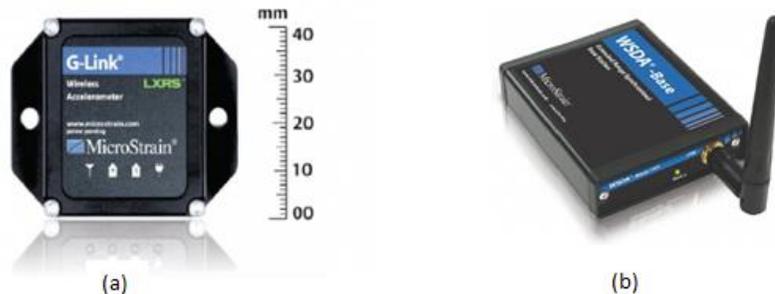


Figura 1.6: (a)G-Link-LXRS, (b)WSDA-Base-104-LXRS

1.4. Tecnologías de Comunicación Inalámbrica

Existen diversas tecnologías para la comunicación inalámbrica, no obstante, se debe analizar cuál es el mejor según los requerimientos que se deseen satisfacer. Se ha reducido el análisis a tres tecnologías.

En primer lugar se tiene la tecnología **WiFi** (IEEE 802.16) que es ampliamente usada en la actualidad. Permite intercambiar grandes volúmenes de información y crear redes locales (LAN), las cuales pueden estar conformadas hasta por 32 dispositivos. Sin embargo, surgió la necesidad de la aparición de WSN (Wireless Sensor Network), las cuales intercambian paquetes de información más pequeños a cambio de un menor nivel de consumo energético. Como ejemplo de WSN, se tiene los protocolos **Bluetooth** y **ZigBee**.

El **Bluetooth** (IEEE 802.15.1) es un protocolo que permite la comunicación punto a punto en un alcance de 10m, que puede expandirse hasta 100m si es que se aumenta al máximo su consumo energético, pero con lo cual perdería una de las características principales de utilizarse como un WSN.

Por otro lado, **ZigBee** [5] (IEEE 802.15.4) es un protocolo especialmente creado para las necesidades de sensores y dispositivos de control. Por ejemplo, a diferencia de WiFi, tiene un ancho de banda mucho más pequeño, pues no se necesita transmitir grandes volúmenes de datos. Además, posee un nivel muy bajo de consumo energético en comparación de las dos tecnologías antes mencionados y su alcance máximo es de 90m. Este protocolo trabaja en la banda libre de 2.4 GHz y en las bandas de 868 y 915 MHz, y su velocidad de transmisión varía según la frecuencia en la que opere (ver tabla 1.2).

Tabla 1.2: Características de transmisión de ZigBee

<i>Frecuencia</i>	<i>Tasa de Transmisión (Kbps)</i>	<i>Alcance Máximo (m)</i>
868MHz	20	75
915MHz	40	75
2.4GHz	250	75

Elaboración: Propia

1.5. Síntesis

Como se ha mencionado, la instrumentación estructural tiene distintas aplicaciones para el estudio de las estructuras. Esto la hace un área muy importante que permite tener un mejor entendimiento del comportamiento que tienen las estructuras ante cualquier tipo de fenómeno. De esta manera, se puede construir sistemas de monitoreo estructural para tener modelos analíticos y estimar daños con métodos no destructivos. Los equipos utilizados en los sistemas de monitoreo estructural han ido cambiando a lo largo del tiempo según el avance de la tecnología. Estos sistemas están conformados de 3 etapas: adquisición, transferencia y visualización de la información.

En la etapa de adquisición, los primeros sistemas estaban conformados de sensores de medición y equipos de adquisición de datos. Después, la tecnología de sensores mejoró hasta el punto de integrar sistemas mecánicos y eléctricos en un mismo chip llamados MEMS. Asimismo, los equipos de adquisición de datos mejoraron en resolución y número de canales de información.

En la etapa de transferencia, se utilizaban cables para conectar los sensores con los equipos de adquisición de datos. Sin embargo, esto generaba sistemas de elevado costo y de difícil instalación. Por esta razón, se procuró integrar la tecnología inalámbrica al monitoreo estructural. Entre estas tecnologías se tienen Wi-Fi y ZigBee, los cuales son especificaciones de estándares de comunicación inalámbrica.

En la etapa de visualización, se tienen diferentes niveles de sistemas gráficos de desarrollo. Para el monitoreo estructural, se hace uso de sistemas de alto nivel, ya que poseen herramientas para el análisis de la información adquirida. Sin embargo, no han sido integrados completamente a los sistemas de monitoreo estructural.

Actualmente, se tiene a la empresa Brüel & Kjær que ofrece equipos especializados para el monitoreo estructural, con acelerómetros de alta precisión (piezoeléctricos). Además, ha sido posible integrar la tecnología de los MEMS con la tecnología inalámbrica en unos dispositivos llamados motes, los cuales además tienen la capacidad de procesamiento. Con estos dispositivos, se tienen 2 empresas que brindan soluciones para sistemas de monitoreo estructural, las cuales son: Crossbow Technology y LORD MicroStrain Sensing Systems.

CAPÍTULO 2

Problemática Actual del Monitoreo Estructural

2.1. Variables Internas

En la figura 2.1, se muestra el flujo del proceso convencional utilizado en los sistemas de monitoreo estructural. Se pueden identificar diversos factores negativos que deben tomarse en cuenta para obtener un sistema con un diseño óptimo. Por ello, se debe considerar las variables que se detallan a continuación:

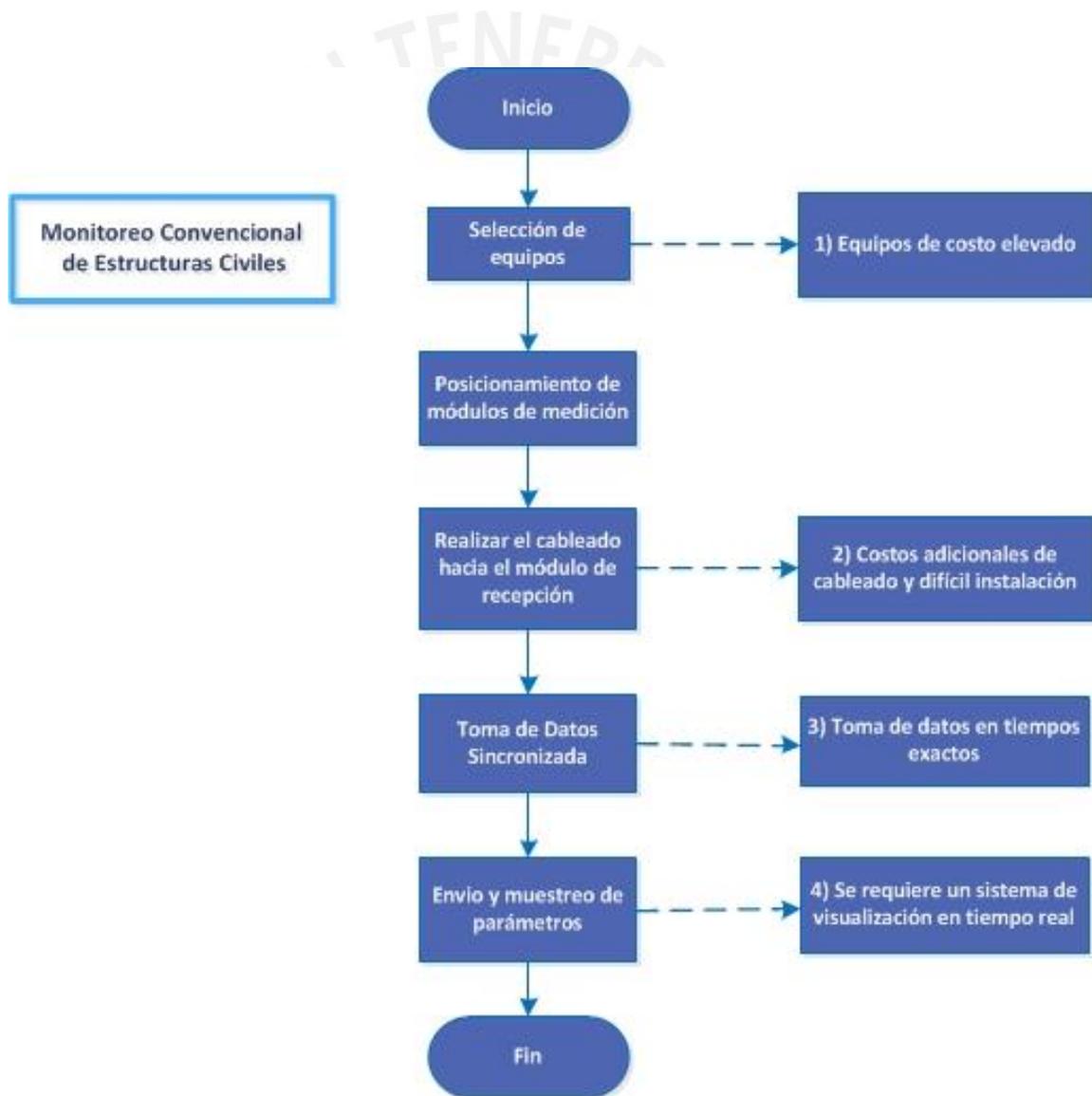


Figura 2.1: Diagrama del Sistema de Monitoreo Estructural Convencional

A continuación, en la tabla 2.1 se presentan los hechos, sus causas y los problemas que estos implican:

Tabla 2.1: Causas y problemas presentes en el Sistema de Monitoreo Estructural Convencional

Hechos	Problemas y Causas
1) Equipos de costo elevado	Los equipos comerciales presentan costos muy elevados debido a que todos son importados, los requerimientos de los sistemas de monitoreo estructural son bastante exigentes y además, muchas veces poseen gran cantidad de funcionalidades no utilizadas para ciertas aplicaciones.
2) Costo adicional de cableado y difícil instalación	Dado que todos los sensores y equipos de adquisición se conectan mediante cables, la compra de estos cables y su instalación respectiva, representa un gasto adicional. Además, el sistema presenta dificultad en el posicionamiento de los módulos, lo cual hace que sea poco portable.
3) Toma de datos en tiempos exactos	Se requiere que todos los datos a procesar y enviar por cada módulo, correspondan a distintos puntos de la estructura adquiridos en el mismo instante de tiempo.
4) Se requiere un sistema de visualización en tiempo real	Es necesario un sistema que permita visualizar todos los parámetros estructurales en tiempo real para conseguir un mejor análisis del comportamiento de la estructura.

Elaboración: Propia

2.2. Marco Problemático

En la actualidad, los sistemas de monitoreo estructural se han convertido en una buena alternativa para el estudio de estructuras. Estos sistemas requieren de equipos de alta resolución y precisión que son importados en su totalidad, por lo cual, presentan costos muy elevados. Además, dado que en los equipos actuales todo está conectado mediante cables, la compra de estos, junto a los costos de instalación, genera un costo adicional. Por otro lado, también genera dificultades a los usuarios al momento de distribuir los módulos en la estructura, ya que pueden estar hasta a decenas de metros de distancia unos de otros, e incluso pueden tener una serie de obstáculos entre ellos, como paredes, columnas, mobiliario, entre otros.

Es evidente que se necesita contar con módulos de medición de parámetros estructurales más económicos, portables y fáciles de manejar para que sean una alternativa más accesible y práctica. Por esto, se desea aprovechar los avances de la tecnología en sensores y el área de comunicaciones.

Finalmente, un punto clave para el correcto funcionamiento del sistema es la toma de datos en tiempos exactos, es decir, la sincronización en la toma de datos. Esto es necesario para poder obtener las magnitudes de los parámetros en distintos puntos de la estructura que correspondan al mismo instante de tiempo, para que de esta manera se pueda obtener un correcto modelo analítico para su posterior estudio. Además, para mejorar el análisis del comportamiento de la estructura, es muy importante el uso de un entorno gráfico de fácil manejo donde se pueda observar el cambio de todos los parámetros en tiempo real.

2.3. Objetivos de la Tesis

2.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo inalámbrico de parámetros de estructuras civiles que permita el análisis de su comportamiento y la visualización respectiva en tiempo real en el monitor de una computadora.

2.3.2. Objetivos Específicos

- a) Diseñar e implementar el sistema de sensado para vibraciones de hasta frecuencias de 40Hz, utilizando un acelerómetro de un solo eje, con un rango de +/-2g y una sensibilidad del orden de 0.1mg.
- b) Diseñar e implementar el sistema de sensado para la temperatura utilizando un sensor capaz de medir rangos entre 0°C y 40°C con una precisión de +/- 0.5°C
- c) Diseñar e implementar el sistema de sensado para la humedad utilizando un sensor capaz de medir rangos entre 50%HR y 100%HR con una precisión de +/- 2%HR.
- d) Diseñar e implementar el protocolo de comunicación inalámbrico entre los módulos de medición y el módulo coordinador.
- e) Diseñar e implementar una interfaz para la comunicación entre el módulo coordinador y la computadora.
- f) Diseñar una interfaz gráfica de usuario que permita la visualización de los parámetros en tiempo real.
- g) Diseñar e implementar la fuente de alimentación del sistema.

CAPÍTULO 3

Diseño e Implementación del Sistema de Monitoreo Estructural Inalámbrico

3.1. Diagrama de Bloques

El sistema de monitoreo inalámbrico de parámetros de estructuras civiles estará conformado por tres módulos de medición que se colocarán en lugares específicos de la estructura, los cuales se comunicarán inalámbricamente con un módulo coordinador, conectado a una computadora. Adicionalmente, contará con una interfaz para el procesamiento y visualización de los parámetros adquiridos en una computadora.

En primer lugar, se tiene la etapa de adquisición compuesta por sensores de aceleración, temperatura y humedad. El parámetro principal a monitorear, es la de aceleración y los requisitos mínimos para el sensor son los siguientes: medición en un solo eje, capacidad de adquirir señales de hasta 40Hz y sensibilidad de 0.1mg. Por otro lado, los sensores de temperatura y humedad serán utilizados para adquirir parámetros ambientales, para conocer las condiciones a las que se toman los datos de aceleración; siendo variables que varían poco en un espacio cercano, los sensores solo serán colocados en uno de los módulos. Se considera como referencia el clima de Lima, por lo cual, se necesita tener aproximadamente un rango de medición de 0°C a 40°C y 50%HR a 100%HR, respectivamente.

Luego, se presenta una etapa acondicionamiento de señal, que será diseñada según las especificaciones técnicas de las etapas de adquisición y de control. En la etapa de control, se utilizará un microcontrolador que tenga la capacidad de satisfacer las necesidades del sistema, por lo cual, antes deben ser definidas las etapas de adquisición y comunicación. Seguidamente, se encuentra la etapa de comunicación inalámbrica, en la que se debe tener en cuenta el alcance (30m mínimo) y sobre todo, el bajo consumo energético (módulos portables) para la selección de la tecnología a utilizar. Finalmente, se tiene la etapa de procesamiento de datos e interfaz de usuario para la interacción usuario – PC.

A continuación, en la figura 3.1, se muestra el diagrama de bloques del sistema de monitoreo estructural previamente descrito, el cual posee etapas de hardware y software:

ET LLA

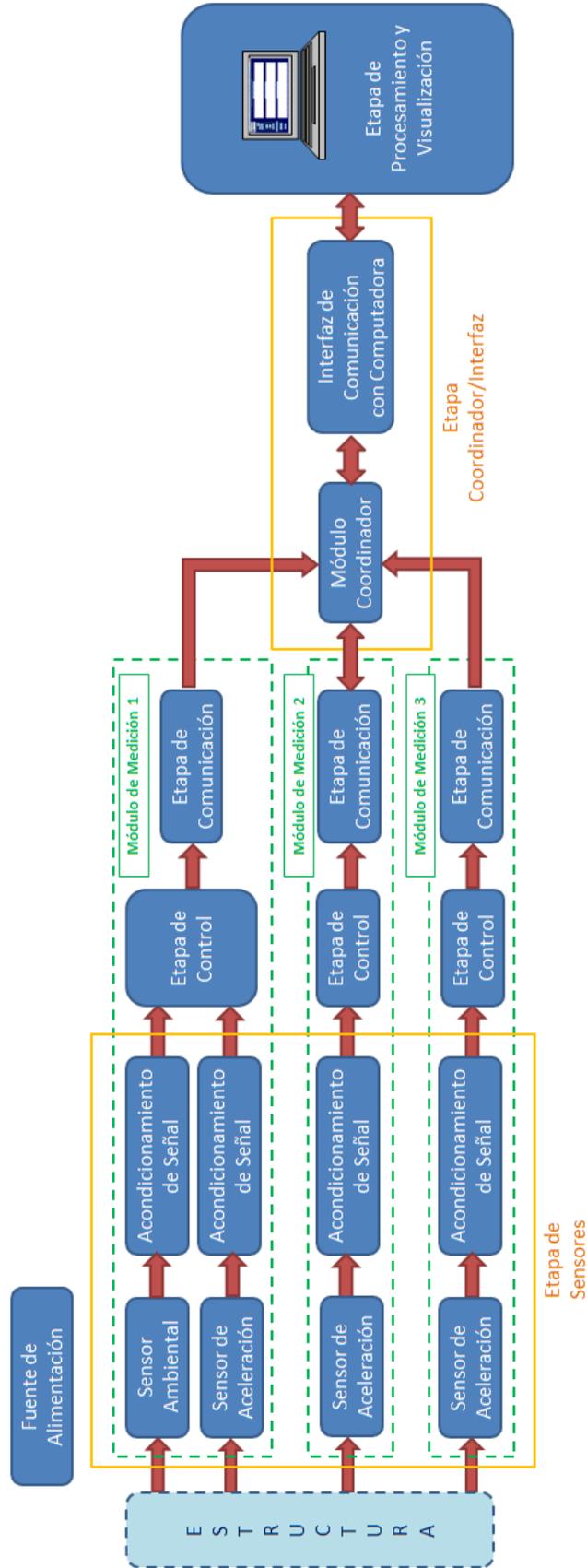


Figura 3.1: Diagrama de Bloques del Sistema de Monitoreo Estructural Inalámbrico

3.2. Etapa de Sensores

3.2.1. Sensor de Aceleración

Requerimientos:

Se requiere que el sensor mida valores de aceleración en un solo eje y posea una sensibilidad mínima de 0.1mg. Además, las frecuencias de vibración de las estructuras a evaluar se encuentran entre 0 y 40 Hz. Según el teorema de Nyquist, se necesita que la frecuencia de muestreo sea al menos el doble de la máxima frecuencia de la señal original para poder recuperarla. Por tal motivo, el acelerómetro debe tener una tasa de adquisición igual o mayor a 80Hz.

Alternativas de Selección:

Como se mencionó anteriormente, en los sistemas de monitoreo estructural son utilizados principalmente los acelerómetros piezoeléctricos, debido a su alta sensibilidad y baja densidad espectral de ruido, sin embargo, poseen un costo muy elevado (más de 1000.00 dólares). Por este motivo, se plantean como alternativas de selección a los acelerómetros de tipo MEMS, que se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Cuadro comparativo de acelerómetros

	MMA1260KEG Análogo [25]	LSM303DLHC Digital [26]	MMA8451Q Digital [27] Board de Adafruit
Rango de Voltaje de Alimentación	(4.75 – 5.25) V	(2.16 – 3.6)V	(1.95 – 3.6)V
Resolución	Depende del ADC	16 bits	8bits / 14 bits
N° de Ejes	1	3	3
Sensibilidad	1.2V/g	1mg/LSB	0.25mg/LSB
Rango de Medición	±1.55g	±2g, ±4g, ±8g, ±16g	±2g, ±4g, ±8g
Tasa de Adquisición	40Hz a 60Hz	0.75Hz a 220Hz	1.56Hz a 800Hz
Costo	\$ 9.35	\$ 7.93	\$ 7.95

Elaboración: Propia

Criterio de Selección:

Se eligió el acelerómetro MMA8451Q (ver figura 3.2), debido a que cumple casi todos los requerimientos (excepto la sensibilidad), es digital y por lo tanto, no requiere una etapa adicional de conversión analógica-digital y también, porque puede ser adquirida en una tarjeta que incluye los componentes necesarios para su buen funcionamiento según la hoja de datos del fabricante. Si bien con este sensor no se logra cumplir el requerimiento de sensibilidad, ya que este solo puede ser satisfecho con sensores piezoeléctricos, se seleccionó el sensor con mejor sensibilidad de las alternativas presentadas. Utilizando este sensor se buscará demostrar el principio de funcionamiento del sistema, pudiendo en un futuro ser reemplazado por uno de mayores prestaciones (acelerómetro piezoeléctrico).



Figura 3.2: Tarjeta del acelerómetro MMA8451Q [27]

Diseño y esquemático:

La tarjeta adquirida se encuentra diseñada de acuerdo al esquemático recomendado por el fabricante, el cual se muestra en la figura 3.3. Se puede observar dos condensadores de 0.1 μ F y uno de 4.7 μ F conectados a los pines 1 y 12 respectivamente, que cumplen la función de desacople, la cual consiste en minimizar el ruido presente en la alimentación. Asimismo, se tiene un condensador de bypass de 0.1 μ F conectado al pin 2, que minimiza el ruido por la conmutación en los dispositivos del circuito y ofrece una pequeña alimentación durante una bajada transitoria de la tensión. Además, los pines I^2C (SDA y SCL) son *open drain*, por lo cual requieren resistencias *pull-up* de 4.7 K Ω en cada línea como parte de su acondicionamiento de señal para la comunicación con la etapa de control.

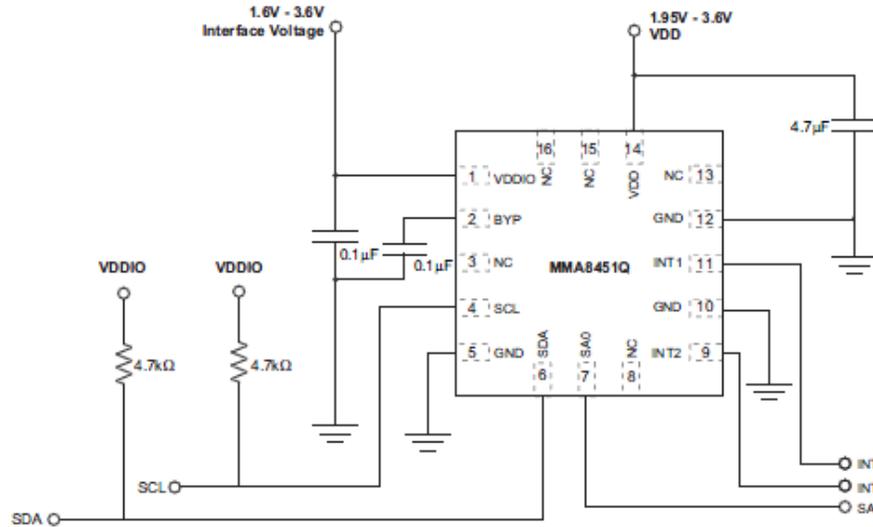


Figura 3.3: Esquemático de la hoja de datos del acelerómetro MMA8451Q [27] (Fuente: Hoja de datos del fabricante)

A continuación, en la figura 3.4, se muestra el esquemático de la tarjeta seleccionada. Adicionalmente a lo requerido por el fabricante, cuenta con un convertor de nivel de tensión de 5V a 3.3V para que pueda ser alimentada hasta con 5V. También, posee dos MOSFETs para asegurar el correcto funcionamiento en la comunicación con un dispositivo alimentado hasta con 5V.

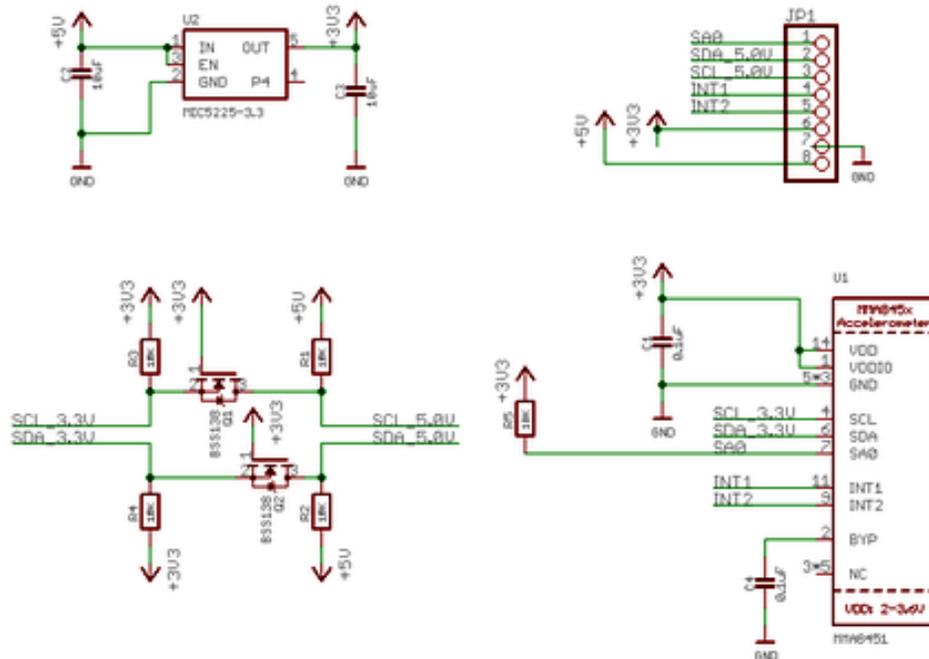


Figura 3.4: Esquemático de la tarjeta del acelerómetro MMA8451Q [27] (Fuente: Adafruit)

Esta etapa será alimentada con una tensión de 3.3V. Considerando que la tensión mínima en las líneas SDA y SCL es 0V, se tendría una diferencia de potencial de 3.3V en las resistencias de *pull-up* de 4.7 KΩ. Esto resulta en una potencia disipada de 2.32mW. Por lo tanto, se escoge una resistencia de 4.7KW a $\frac{1}{4}$ W.

3.2.2. Sensor Ambiental

Requerimientos:

Se requiere medir los parámetros ambientales de temperatura y humedad del entorno en el que se encuentra la estructura de interés, para poder conocer bajo qué condiciones se realiza el monitoreo estructural. Partiendo como referencia al clima de Lima, los rangos de adquisición mínimos requeridos para cada uno de los parámetros son los siguientes:

Temperatura: $[0 - 40] \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$

Humedad: $[50 - 100] \text{ \%HR} \pm 2\%$

Alternativas de Selección:

Se limitó la búsqueda a sensores que, además de cumplir los requisitos planteados, sean capaces de medir ambos parámetros y que su salida sea digital, para de ese modo evitar el uso de hardware adicional requerida para una conversión analógica-digital de la señal.

Tabla 3.2: Cuadro comparativo de sensores ambientales

	RHT03 [28] Digital	SHT21 [29] Digital
Rango de Voltaje de Alimentación	3.3 – 6 V	2.4 – 5.5 V
Rango de Temperatura	$[-40 - 80]^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$	$[-40 - 125]^\circ\text{C} \pm 0.3^\circ\text{C}$
Rango de Humedad	$[0 - 100] \text{ \%HR} \pm 2\%$	$[0 - 100] \text{ \%HR} \pm 2\%$
Resolución	16 bits (temperatura) / 16 bits (humedad)	14 bits (temperatura) / 12 bits (humedad)
Protocolo de Comunicación	Propio (Maxdetect)	I2C
Costo	\$ 9.95	\$ 12.44
Disponibilidad	Mercado local	Importación

Elaboración: Propia

Criterio de Selección:

Ambos sensores cumplen con los requerimientos, por lo que se eligió el sensor RHT03 (ver figura 3.5), debido a que su costo es inferior y se puede conseguir en el mercado local.



Figura 3.5: Sensor RHT03 [28]

Diseño y esquemático:

En la hoja de datos del sensor se especifica que es necesario colocar una resistencia de *pull-up* en el pin de data, como parte de su acondicionamiento para la comunicación con el microcontrolador. Esto se encuentra en la tarjeta principal (ver figura 3.6) de los módulos de medición, la cual se detalla más adelante en la etapa de control.

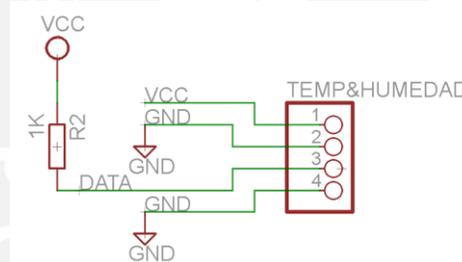


Figura 3.6: Esquemático del sensor RHT03

En el caso de la resistencia R2, se asigna el valor de 1 K Ω , según lo indicado en la hoja de datos del fabricante[28]. Durante la medición, este dispositivo consume 1.5mA como máximo. Con esto, se tiene que la potencia disipada por la resistencia será 2.25mW. Por lo tanto, se escoge una resistencia de 1 K Ω a ¼ W.

3.3. Etapa de Comunicación

Requerimientos:

Para la comunicación entre los módulos de medición y el módulo coordinador del sistema de monitoreo, es requisito fundamental el uso de una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo, debido a que los módulos deben ser portátiles. Además, esta tecnología debe permitir la interconexión entre 4 o más dispositivos. Debe permitir comunicación entre módulos en un rango mínimo de 50m.

Alternativas de Selección:**Tabla 3.3:** Cuadro comparativo de tecnologías de comunicación

	Bluetooth 2.0	ZigBee
Velocidad máxima	1Mbps	250Kbps
Topologías de red	Punto a punto	Punto a punto, punto a multipunto, malla
Cobertura máxima	100m	90m
Banda de Operación	2.4GHz	2.4GHz
Tipos de nodos	Maestro, Esclavo	Coordinador, Router, Dispositivo Final
Consumo aproximado	100mA	50mA
Aplicaciones Típicas	Conexión inalámbrica entre dispositivos (celulares, laptops, tablets, etc)	Control y monitoreo industrial, redes de sensores, automatización.
Disponibilidad	Mercado Local	Mercado Local

Elaboración: Propia

Criterio de Selección:

Se eligió el protocolo de comunicación ZigBee principalmente por su bajo consumo y también, porque permite una topología punto-multipunto, la cual se ajusta al esquema de red requerido, donde se tendrán tres nodos de adquisición y un único nodo coordinador, que enviará la señal de medición y recibirá toda información de interés. Además, permite tener como futuro desarrollo la implementación de topologías tipo malla con nodos en modo router, haciendo posible la adquisición de datos de nodos que están fuera de la cobertura máxima.

En la presente tesis se utilizaron cuatro XBee Serie 1 que poseen las siguientes características particulares (tabla 3.4):

Tabla 3.4: Especificaciones del módulo XBee S1

	XBee Serie 1 [31]
Rango de Alimentación	(2.8 – 3.4)V
Cobertura máxima	90m
Consumo máximo	45mA
Ganancia de antena monopolo	1.5dBi

Elaboración: Propia

Módulo XBee de Medición:

El sistema de monitoreo está conformado por tres módulos de medición, cada uno de ellos posee un módulo XBee (ver figura 3.7) configurado como dispositivo final y direcciones distintas entre sí. Cada módulo se encargará de recibir la información adquirida de aceleración, temperatura y humedad y la transmitirán al módulo coordinador.



Figura 3.7: Módulo XBee Serie1 [31]

Diseño y esquemático:

En la figura 3.8, se muestra el esquemático de la etapa de comunicación de cada uno de los módulos de medición. El módulo XBee se alimentará con 3.3V y estará conectado al microcontrolador mediante los pines de comunicación DIN y DOUT (pines 2 y 3, respectivamente).

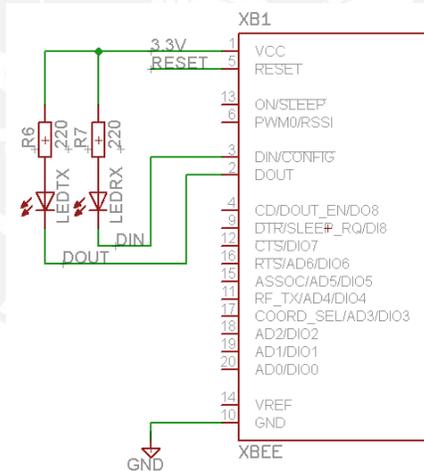


Figura 3.8: Esquemático de etapa de comunicación

Como se puede observar, se agregarán 2 LEDs ultrabrillantes (LEDTX y LEDRX) como indicadores para la transmisión y recepción de información. Para esto, se coloca una resistencia en serie con cada LED, que servirá para regular la corriente. Para los cálculos de las resistencias R6 y R7, se considerará como valores referenciales [33], una caída de tensión de 1.72V y una corriente de 1mA, obteniendo de esta manera resistencias de 1.5 KΩ a ¼ W.

3.4. Etapa Coordinador/Interfaz

3.4.1. Módulo Coordinador

En la etapa anterior se eligió la tecnología ZigBee y, como se indicó, se utilizarán módulos XBee Serie 1 en los módulos de medición, por lo tanto, también se requiere un dispositivo idéntico en el módulo coordinador (ver figura 3.7). Este módulo XBee estará configurado como coordinador y cumplirá la función de enviar y recibir información de los módulos XBee que se encuentran en los módulos de medición.

3.4.2. Interfaz con la Computadora

Para la interfaz entre el módulo XBee y la computadora, la empresa Sparkfun ofrece una alternativa práctica y económica. El dispositivo se llama XBee Explorer, el cual se muestra en la figura 3.9 y permite la conexión con un puerto USB de la computadora mediante un cable conversor de mini USB a USB.



Figura 3.9: Módulo XBee Explorer

Diseño y esquemático:

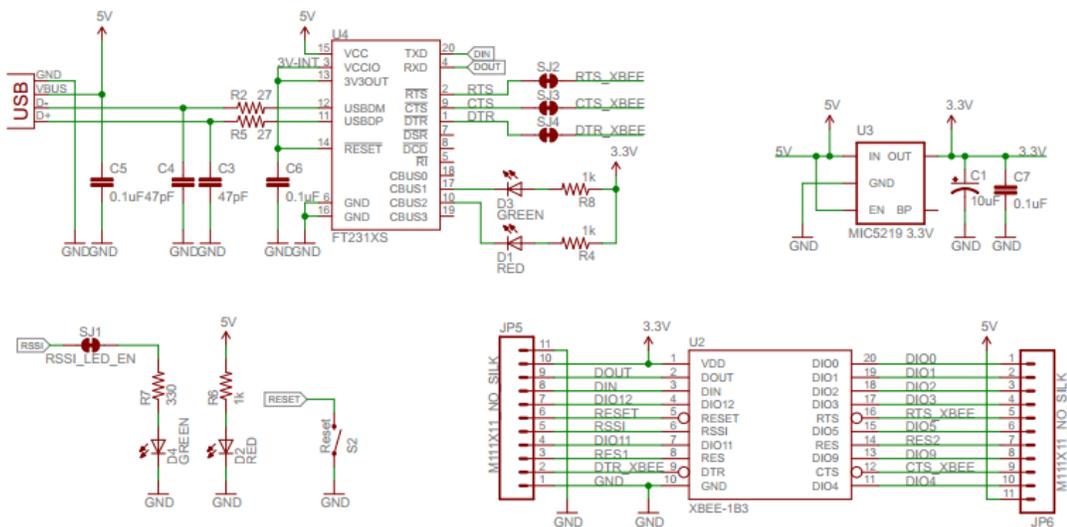


Figura 3.10: Esquemático de la etapa de interfaz

(Fuente: Sparkfun)

En la figura 3.10, se muestra el esquemático del XBee Explorer. Este posee un integrado FT231X, convertidor de USB a UART (serial); un regulador de voltaje a 3.3V, para alimentar el módulo XBee con el nivel de tensión adecuado; LEDs indicadores para transmisión (Tx), recepción (Rx) e intensidad de señal (RSSI); y un conector mini USB.

Configuración de Módulos XBee:

Para la configuración y prueba de los XBee, el fabricante (Digi International Inc.) brinda en su página web un software gratuito llamado X-CTU [32]. Para poder realizar la configuración de los XBee, éstos son colocados en el XBee Explorer y conectados a una computadora mediante un cable mini USB / USB.

Para que exista comunicación entre los XBee deben pertenecer a una misma red, es decir, estar configurados con la misma red de área personal (PAN ID) y canal (CH). Adicionalmente, todos deben estar configurados con la misma velocidad de transmisión y tener una dirección propia única.

Se creó una red punto-multipunto bidireccional (ver figura 3.11) configurando las direcciones de destino de cada dispositivo (DL). Esto quiere decir que el coordinador puede comunicarse con los otros tres XBee por medio de una transmisión hacia todos los nodos de la red al mismo tiempo, llamado también *broadcast* (DL = FFFF); y los otros tres XBee con el coordinador, pero no entre sí (DL = 5678). En la tabla 3.5 se observa la configuración realizada.

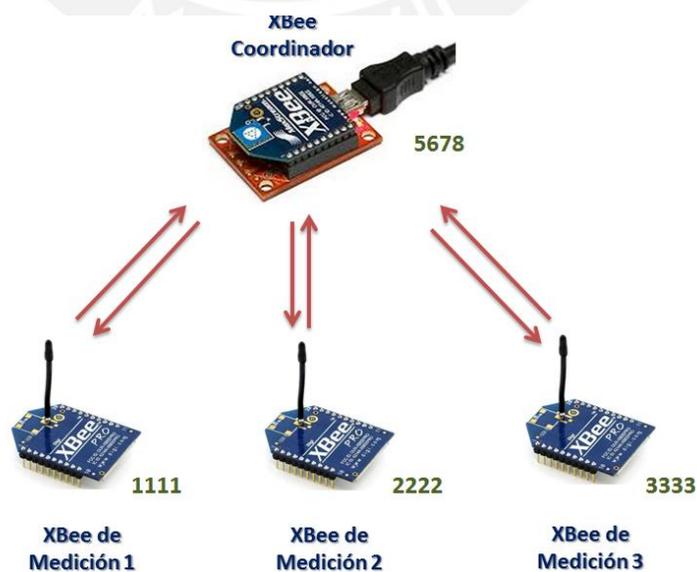


Figura 3.11: Red XBee punto - multipunto

Tabla 3.5: Configuración de la red de sensores

	Coordinador	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
MY (Dirección Propia)	5678	1111	2222	3333
DL (Dirección de Destino)	FFFF	5678	5678	5678
PAN ID (ID de Red de Área Personal)	3332	3332	3332	3332
CH (Canal)	10	10	10	10
CE (Habilitador de Coordinador)	1	0	0	0
BD (baudios)	57600	57600	57600	57600

Elaboración: Propia

3.5. Etapa de Control

Esta etapa se encarga de recibir los valores digitales de aceleración transmitidos por el acelerómetro. Dado que el sensor seleccionado previamente cuenta con comunicación I^2C , será necesario que el microcontrolador permita este tipo de comunicación.

Además, el sensor ambiental digital cuenta con un protocolo propio del fabricante, el cual requiere que se envíe una petición por un intervalo de tiempo y se espere una respuesta, la cual será interpretada por la duración del intervalo de la señal en alta (será explicado en mayor detalle en la descripción de la subrutina de adquisición para los parámetros ambientales). Como la temperatura y la humedad poseen una variación lenta, solo se requerirá una muestra cada minuto.

Por último, para transmitir los paquetes de datos al módulo XBee se requiere el protocolo UART.

Requerimientos:

- Comunicación I^2C para la transmisión de datos del acelerómetro. Requiere 2 pines.
- Un pin bidireccional de entrada/salida para la transmisión de datos del sensor ambiental.
- Un temporizador de 8 bits para la interpretación de datos de la respuesta del sensor ambiental.

- Un temporizador de 16 bits para la petición de datos del sensor ambiental cada minuto.
- Comunicación serial incorporada con protocolo UART. Requiere 2 pines para la transmisión (TX) y recepción (RX) de datos entre el microcontrolador y el módulo XBee.
- Cristal externo para estabilidad frente a variaciones de temperatura.
- Memoria de programa con capacidad mínima de 12 KB que permita el uso de librerías.

Alternativas de Selección:

Entre los microcontroladores que se comercializan en el mercado local destacan los PIC de Microchip y ATmega de Atmel.

A continuación, se presentará una comparación entre los microcontroladores PIC16F873A de Microchip y ATmega328 de Atmel, haciendo énfasis en sus características más resaltantes.

Tabla 3.6: Tabla comparativa de microcontroladores

	ATmega328 [34]	PIC16F877A [35]
Voltaje de alimentación	1.8V - 5.5V	2.0V - 5.5V
Número de pines disponibles	23 pines de propósito general	33 pines de entrada/salida
Periféricos	<ul style="list-style-type: none"> • 2 contadores de 8 bits • 1 contador de 16 bits • 6 canales PWM • 6 canales ADC de 10 bits • USART • Interfaz para I²C 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 contadores de 8 bits • 1 contador de 16 bits • 2 canales PWM • 8 canales ADC de 10 bits • USART • Interfaz para I²C
Memoria de Programa	32 KB	8 KB
Memoria de Datos	2 KB	368 Bytes
Frecuencia de Operación	1 MHz – 8 MHz con oscilador interno, hasta 20 MHz con cristal externo	1 MHz – 20 MHz
Documentación disponible	Hoja de datos del fabricante	Hoja de datos del fabricante
Disponibilidad	Mercado local	Mercado local

Elaboración: Propia

Criterio de Selección:

Como se puede observar en la tabla 3.6, ambos microcontroladores cumplen con los requerimientos. Por lo tanto, se selecciona el ATmega328, debido a que se posee un mayor dominio en su manejo y programación. Además, se empleará el lenguaje de programación C, por la familiaridad con este debido a experiencias anteriores.

Diseño y esquemático:

En la figura 3.12, se muestra el esquemático de la etapa de control, la cual consta del microcontrolador ATmega328 con todos los componentes necesarios para su correcto funcionamiento. Asimismo, se incluye un pulsador para resetearlo y un conector ICSP de 10 pines para programarlo.

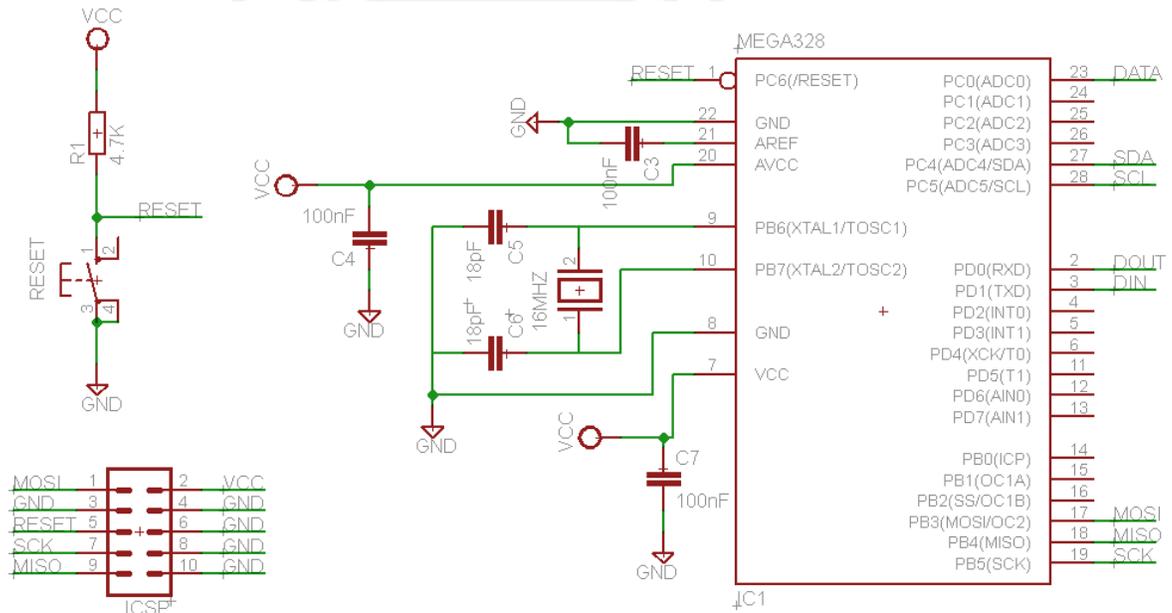


Figura 3.12: Esquemático de la etapa de control

Los condensadores C3, C4 y C7 son de desacoplo y se emplean para minimizar el ruido producido en la alimentación. El pulsador RESET tiene la función de reiniciar el microcontrolador. Para esto, se utiliza la resistencia R1 como resistencia de *pull-up*, la cual es recomendada en la hoja de datos. Además, se utiliza un cristal externo de 16 MHz para obtener el menor error posible (0.8%) en el proceso crítico de la comunicación según la hoja de datos. Este cristal necesita dos capacitores (C5 y C6) para su correcto funcionamiento.

Los pines del microcontrolador empleados son los siguientes:

- RESET (Pin 1): Circuito de Reset externo.
- RX y TX (Pines 2 y 3): Transferencia de datos con el módulo XBee.
- VCC y AVCC (Pines 7 y 20): Tensión de alimentación.
- GND (Pines 8 y 22): Tierra.
- XTAL1 y XTAL2 (Pines 9 y 10): Circuito del cristal externo de 16 MHz.
- MOSI, MISO, SCK (Pines 17, 18 y 19): Programación del microcontrolador.
- PC0 (Pin 23): Adquisición de datos del sensor ambiental.
- SDA y SCL (Pines 27 y 28): Transferencia de datos con el acelerómetro.

El diseño de esta tarjeta será el mismo para los tres módulos, ya que la única diferencia es que uno de los módulos tendrá un sensor de aceleración y un sensor ambiental, mientras que los otros dos, únicamente un sensor de aceleración cada uno, por lo que los pines correspondientes al sensor ambiental se dejarán libres.

Diagrama de Flujo del Programa Principal:

En la figura 3.13, se muestra el diagrama de flujo del programa principal, el cual cuenta con dos partes. Por un lado, la primera es la configuración inicial del microcontrolador y cuenta con las siguientes subrutinas: Configuración de puertos, configuración de comunicación serial, configuración de la comunicación mediante I^2C , configuración de los sensores (acelerómetro y ambiental) e inicialización de variables. Estas subrutinas se encargan de preparar los puertos de entrada y salida y los parámetros para la transferencia de información con los sensores y el módulo XBee.

Por otro lado, la segunda parte es el proceso de toma y envío de datos. Este se inicia con la recepción del pedido del coordinador y una vez obtenida se procede a leer los sensores y enviar los datos por serial. En el caso del módulo con el sensor ambiental, se hace la lectura de sus parámetros solo si ha pasado un minuto desde la última lectura. Para los otros módulos, no se toma en cuenta los bloques que corresponden a la lectura del sensor ambiental. Además, se tiene un tiempo de retardo en cada módulo de medición antes de la transmisión de datos, lo cual evita la colisión de información y se consigue que todos los datos lleguen correctamente al módulo coordinador. Esto último será explicado en mayor detalle en el capítulo 4.

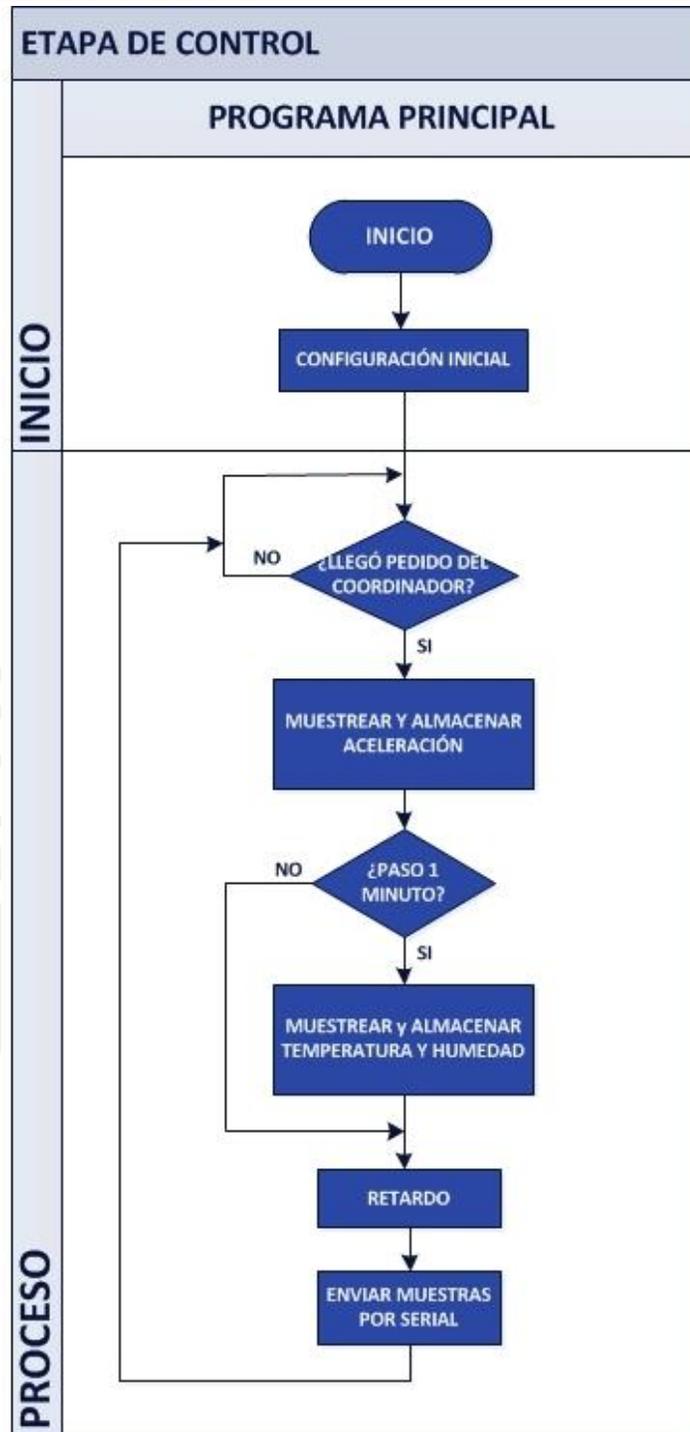


Figura 3.13: Diagrama de flujo del Programa Principal

Las subrutinas a utilizar son las siguientes:

Subrutina para la aceleración:

Las condiciones a la que se trabajarán son las siguientes:

Resolución: +/- 2 gravedades

Sensibilidad: 4096 cuentas/g

Comunicación: I^2C

Modo de trabajo: Alta resolución (14 bits) y bajo ruido.

La velocidad de datos de salida será configurada a 100Hz, dado que la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual a 80Hz como se explicó en los requerimientos del acelerómetro. Además, con esta tasa de adquisición se obtiene un nivel de ruido RMS igual a 0.659mg, tal y como lo detalla la nota de aplicación AN4075 del fabricante [36].



Figura 3.14: Diagrama de flujo de la subrutina para la aceleración

En la figura 3.14, se tiene el diagrama de flujo de la subrutina para la adquisición del valor de aceleración en el eje Z. Para esto, se realiza la lectura del registro del acelerómetro que contiene esta información. Estos registros son OUT_Z_MSB (dirección 0x05) y OUT_Z_LSB (dirección 0x06). Luego de finalizada la lectura, el acelerómetro envía el dato solicitado hacia el microcontrolador y es guardado en memoria. Este valor está expresado en complemento a 2 e indica la aceleración según el número de cuentas, por lo que debe ser procesado en una etapa posterior.

Subrutina para los parámetros ambientales:

Descripción del protocolo de comunicación:

Como se mencionó en los requerimientos, el sensor seleccionado cuenta con un protocolo propio que utiliza una sola línea de comunicación, de ahí su nombre en inglés “MaxDetect 1-wire bus”. Para poder obtener una muestra de temperatura y humedad, se debe realizar un proceso que consta los siguientes pasos:

- **Paso 1:** El microcontrolador envía una señal de petición al sensor. Como se observa en la figura 3.15, se debe poner el bus en baja por un tiempo de al menos 1 ms y luego ponerlo en alta esperando la respuesta del sensor. Cuando el sensor detecta la petición, coloca el bus en baja por 80 us y luego en alta por 80 us más, haciendo que el microcontrolador esté preparado para recibir la información.

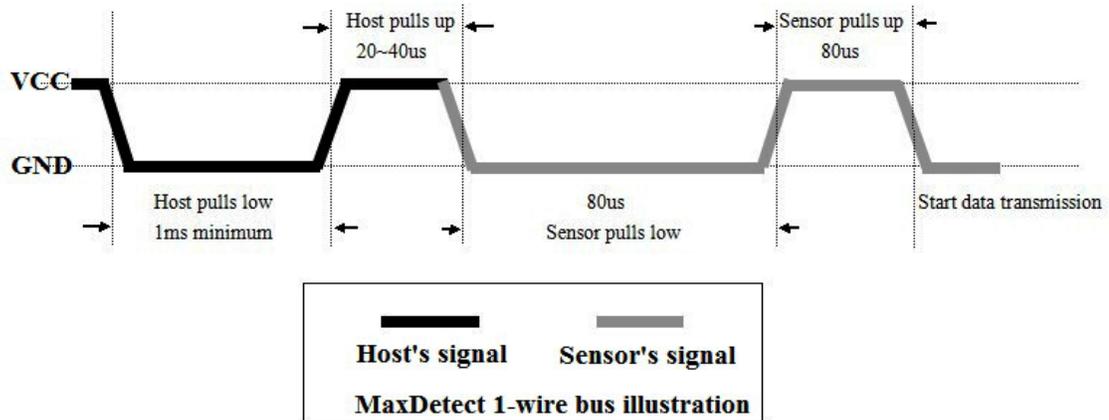


Figura 3.15: Señal de petición para el sensor RHT03 [28]

- **Paso 2:** El sensor envía los parámetros ambientales al microcontrolador. Como se indica en las figuras 3.16, cada bit se inicia colocando el bus en baja por un tiempo aproximado de 50 μ s para luego ser puesto en alta. Si el tiempo en alta está entre 26 y 28 μ s, se trata de un '0' lógico. Por otro lado, si el tiempo en alta es de 70 μ s, se trata de un '1' lógico.

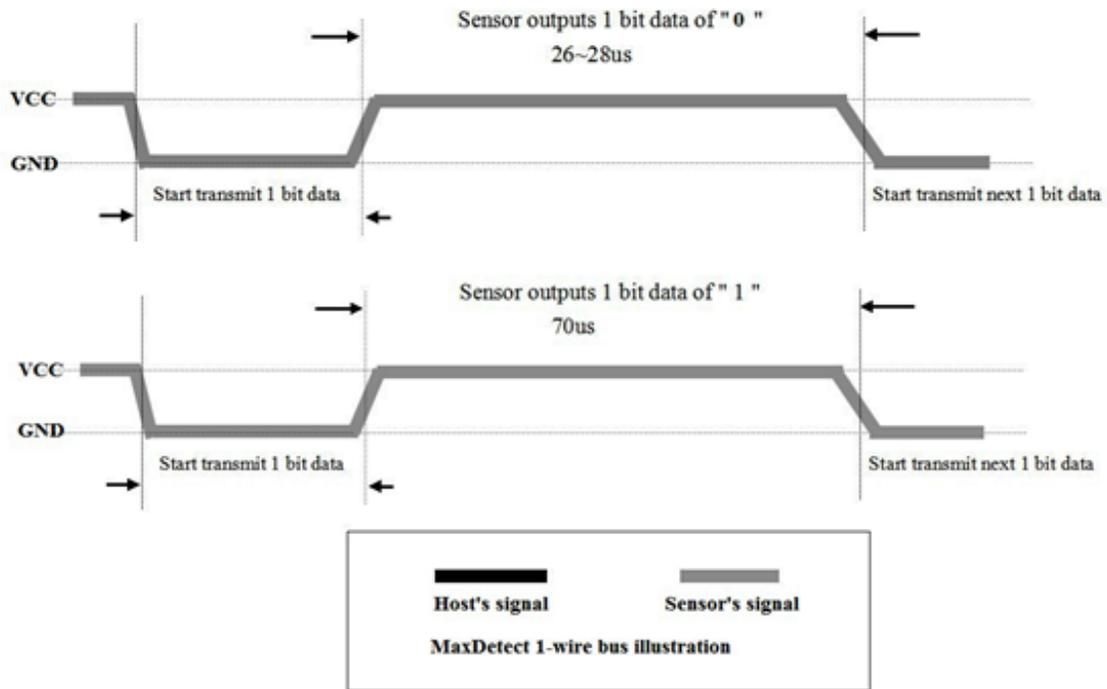


Figura 3.16: Trama de información del sensor RHT03 [28]

Formato de la trama:

La información recibida por el microcontrolador consta de 40 bits, es decir, 5 bytes. Los dos primeros bytes corresponden a la humedad, los otros dos bytes a la temperatura y el último byte a un *checksum*.

Los valores de humedad y temperatura corresponden a las unidades de %RH y $^{\circ}$ C, respectivamente. Estos son enviados en formato de números enteros y para obtener el valor real estos deben ser divididos entre 10. Además, para determinar el signo de la temperatura se debe analizar el bit más significativo. Si es un '0', se trata de un valor positivo y si es un '1', será un valor negativo. Por otro lado, el byte de *checksum* corresponde a la suma byte a byte de cada uno de los 4 bytes anteriores y se utiliza para verificar que el dato recibido es correcto.

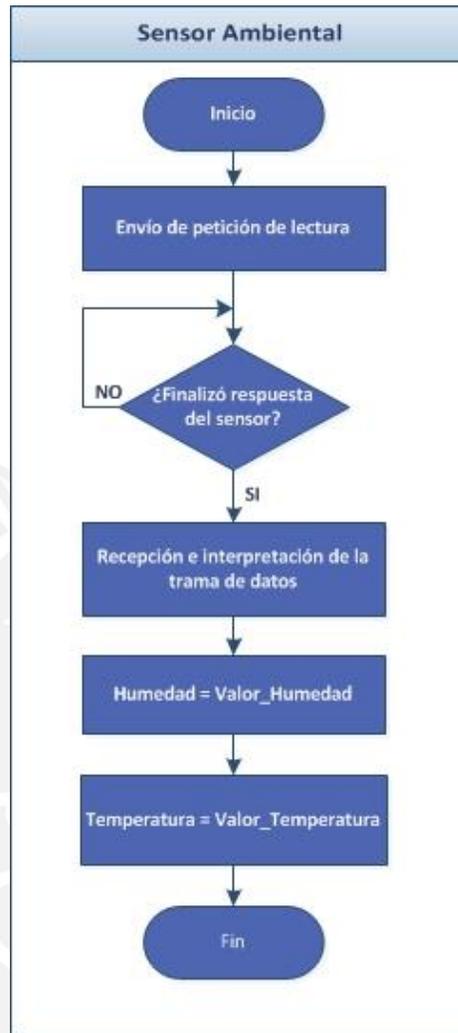
Diagrama de Flujo:

Figura 3.17: Diagrama de flujo de la subrutina para parámetros ambientales

En la figura 3.17, se muestra el diagrama de flujo para la adquisición de los valores de humedad y temperatura. Se realizan los pasos para el protocolo de comunicación del sensor y se asignan los parámetros ambientales según el formato de la trama. La ejecución de esta subrutina ocurre una vez cada minuto, donde se lee constantemente el estado del pin asignado en el microcontrolador para la transferencia de datos. Las partes de la subrutina que están relacionadas con tiempos hacen uso de los temporizadores del microcontrolador por medio de las funciones propias del entorno de programación.

Subrutina de interrupción de recepción:

En la figura 3.18, se desarrolla el diagrama de flujo de la subrutina, la cual se ejecuta cada vez que se reciben datos por serial.

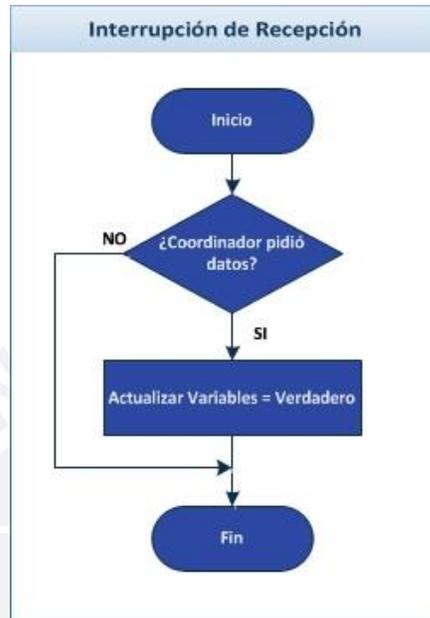


Figura 3.18: Diagrama de flujo de interrupción de recepción

La señal de pedido de datos es enviado desde el módulo coordinador a cada uno de los módulos de medición, la cual funciona como la señal de sincronización para la toma de datos. Para este fin, se utiliza al carácter 'S'. Al recibirse correctamente, se activa la bandera de nombre "Actualizar Variables", la cual inicia el proceso en la etapa de control. Además, asegura que los parámetros hayan sido muestreados prácticamente en un mismo instante de tiempo, lo cual será explicado en el capítulo 4. De no recibirse el pedido del módulo coordinador, no ocurre nada en esta subrutina.

Protocolo de la trama de datos:

Para la transmisión de información desde los módulos de medición al módulo coordinador, se tiene el siguiente protocolo:

Cabecera – Acel1 – Acel2

- **Cabecera:** Indica el módulo desde el que se envió la información. Para este caso, se utiliza los caracteres 'A' para el módulo 1, 'B' para el 2 y 'C' para el 3.

- **Acel1:** Es el byte menos significativo del valor de la aceleración.
- **Acel2:** Es el byte más significativo del valor de aceleración.

Además, para el módulo que cuenta con el sensor ambiental, se le debe adicionar las variables respectivas, quedando de la siguiente manera:

Cabecera – Acel1 – Acel2 - Temp1 - Temp2 – Hum1 – Hum2

- **Temp1:** Es el byte menos significativo del valor de la temperatura.
- **Temp2:** Es el byte más significativo del valor de temperatura.
- **Hum1:** Es el byte menos significativo del valor de la humedad.
- **Hum2:** Es el byte más significativo del valor de humedad.

3.6. Etapa de Alimentación

Requerimientos:

Luego de diseñadas las etapas previas, es necesario considerar el voltaje de alimentación y consumo de corriente de los principales componentes de la tarjeta de medición para poder obtener los requerimientos mínimos de la etapa de alimentación. En la tabla 3.7, se puede observar la información requerida extraída de las hojas de datos de los componentes:

Tabla 3.7: Tabla de consumo del sistema

	Rango de Voltaje de Alimentación (V)	Consumo Máximo (mA)
ATmega328	1.8 a 5.5	5
RHT03	3.3 a 6	1.5
MMA8451Q	1.95 a 3.6	0.165
XBee	2.8 a 3.4	45
LEDs (3 unid.)	-	3
TOTAL		54.665 mA

Elaboración: Propia

El voltaje seleccionado para la alimentación de la tarjeta del módulo de medición será 3.3V y se deberá poder operar con corrientes de hasta 54.665 mA.

Diseño y esquemático:

Se utilizará una batería de litio recargable de 3.7V, debido a que presenta un mayor tiempo de vida frente a las baterías alcalinas. Además, se requiere un circuito que regule el voltaje al requerido y un diodo de protección entre la batería y el regulador.

Considerando que se trabajará con corrientes pequeñas en el orden de los miliamperios y se necesita una baja corriente de fuga y una diferencia de potencial pequeña entre la entrada y la salida del regulador, lo cual permitirá prolongar la vida de la batería, se decide utilizar un regulador LDO (*Low Dropout*). Por tal motivo, se selecciona un regulador con código TPS78233, que posee las siguientes especificaciones (tabla 3.8):

Tabla 3.8: Especificaciones del LDO TPS78233

	TPS78233 [37] LDO
Rango de Voltaje de Alimentación	-0.3V a 6V
Voltaje de Salida	3.3V
Corriente de Salida	150mA
Corriente de fuga	8 μ A
Diferencia de voltaje entre la entrada y la salida (<i>Dropout voltage</i>)	130mV
Eficiencia	80% a 90%
Costo	\$0.90

Elaboración: Propia

Como se puede observar en la figura 3.19, se colocan 2 condensadores cerámicos como recomendación del fabricante. El condensador C8 sirve para minimizar el ruido y rizado a la entrada y el condensador C9 da estabilidad a la salida. Además, se agrega un diodo Schottky de protección con código RB521S30 [38] en caso se conecte la batería con polaridad inversa. Asimismo, se tiene un interruptor ON/OFF para controlar el encendido y apagado del módulo de medición y un LED ultrabrillante como

indicador para esta función. La resistencia R5 sirve para regular la corriente que circula por el LED y su cálculo se hace de la misma forma que para los LEDs indicadores en la etapa de comunicación, con lo que se obtiene el valor de 1.5 KΩ a ¼ W.

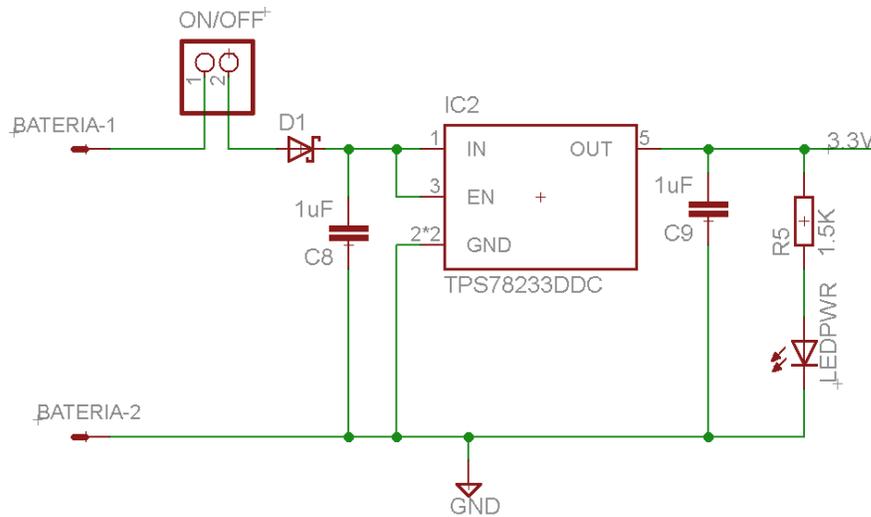


Figura 3.19: Parte del esquemático de la etapa de alimentación

Dado que se propuso una batería de litio recargable, se adiciona a esta etapa un circuito que permita recargarlo, quedando el esquemático de la siguiente manera:

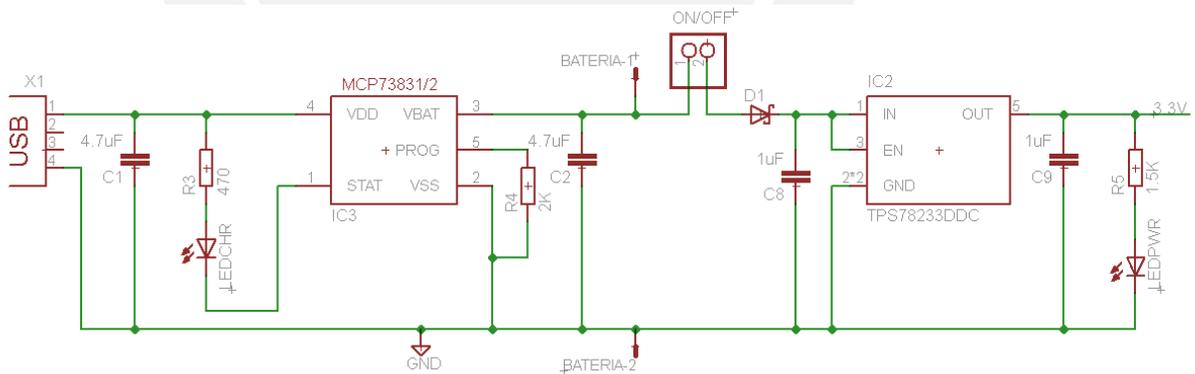


Figura 3.20: Esquemático de la etapa de alimentación

En la figura 3.20, se tiene el circuito integrado MCP73831 [39], el cual funciona como un controlador para la recarga de la batería con una corriente configurable hasta 500 miliamperios. Para esto, se coloca la resistencia R4 y su valor se obtiene de la siguiente operación:

$$I_{REG} = \frac{1000V}{R_{PROG}}$$

Donde I_{REG} es la corriente de salida en miliamperios y R_{PROG} es la resistencia para la configuración de la corriente en Kiloohmios. Fijando la corriente de salida del integrado al máximo disponible (500 mA), se obtiene el valor de la resistencia R4, el cual es 2 K Ω a ¼ W.

Los condensadores C1 y C2 se agregan como recomendación de la hoja de datos del fabricante para el correcto funcionamiento del circuito. El primero sirve como bypass y el segundo brinda estabilidad a la salida. Además, se agrega un LED ultrabrillante como indicador para la función de recarga junto con la resistencia R3 y, según la hoja de datos, se le asigna el valor de 470 Ω a ¼ W.

Se fija el voltaje de alimentación del circuito integrado en 5V, ya que debe estar entre 3.75V y 6V. Dado que va a operar a una corriente de 500mA, se decide alimentar esta etapa de recarga utilizando una conexión USB, colocando un conector mini USB para ser conectado con el puerto USB de la computadora mediante el mismo cable conversor de mini USB a USB que utiliza el XBee Explorer.

Por último, para calcular el tiempo de duración de la batería, se debe conocer la capacidad de esta. Se escoge una batería de litio recargable de 3.7V y 1200mAh de capacidad. Como se tiene una corriente máxima de aproximadamente 55mA, entonces el tiempo de duración mínimo de la batería se calcula con la división de la capacidad entre la corriente máxima, lo cual da como resultado 21.8 horas. Cabe mencionar que de desearse un tiempo mayor, se necesitará de una batería con mayor capacidad, lo que representa un aumento del costo.

3.7. Etapa de Procesamiento e Interfaz de Usuario

Requerimientos:

El software debe permitir el envío y recepción de datos por el puerto serial de la computadora, la visualización de gráficas en tiempo real de los parámetros adquiridos, el almacenamiento de arreglos de variables y realizar funciones matemáticas, como por ejemplo, la transformada rápida de Fourier (FFT). Adicionalmente, debe permitir la creación de una interfaz gráfica para la interacción con el usuario.

Alternativas de Selección:

- **MATLAB:** Es un lenguaje de alto nivel y entorno interactivo, el cual permite la utilización de funciones matemáticas, cálculo numérico, desarrollo de algoritmos, adquisición, análisis y visualización de datos (tablas, gráficas 2D y 3D), entre muchas otras funcionalidades. Además, cuenta con un entorno gráfico para diseño de interfaz de usuario (GUIDE).
- **Visual Basic:** Lenguaje de programación de aplicaciones orientadas a objetos. Permite cálculos numéricos, desarrollo de tablas, gráficas, interfaz gráfica. Especializado en aplicaciones de Microsoft, web y para teléfonos móviles.

Criterio de Selección:

Se seleccionó el software MATLAB, porque además de cumplir con los requerimientos, es un lenguaje de programación en el que se cuenta con conocimientos básicos previos.

3.2.6.1. Procesamiento de datos:

Las condiciones a las que se trabajará son las siguientes:

- Velocidad de transmisión: 57600 baudios
- Número de bits: 8
- Paridad: Ninguna
- Bits de Parada: 1
- Frecuencia de muestreo: 100 Hz. Con este valor de frecuencia se obtienen las 100 muestras por cada módulo de medición en un tiempo total de 1 segundo (1 sola petición para los 3 módulos).

Diagrama de Flujo del Programa Principal

En la figura 3.20, se muestra el diagrama de flujo del programa principal, que cuenta con 2 etapas. Por un lado, la primera cuenta con las subrutinas para la inicialización de las variables a utilizar y la configuración de los parámetros para la comunicación serial. Por otro lado, la segunda etapa es el proceso de adquisición de datos, donde se envía el carácter de inicio para la toma de datos y sirve como señal de sincronización para los tres módulos de medición. Además, se tiene un tiempo de retardo hasta la próxima toma de datos y es cuando se reciben las muestras. Dado que se obtendrán 100 muestras por segundo de cada módulo, este tiempo será igual a 10 milisegundos. Se continúa con este proceso mientras que no haya sido finalizado por el usuario mediante la interfaz gráfica. Adicionalmente, completado el proceso de adquisición de datos, se podrá obtener la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para la aceleración medida en cada uno de los tres módulos de medición.

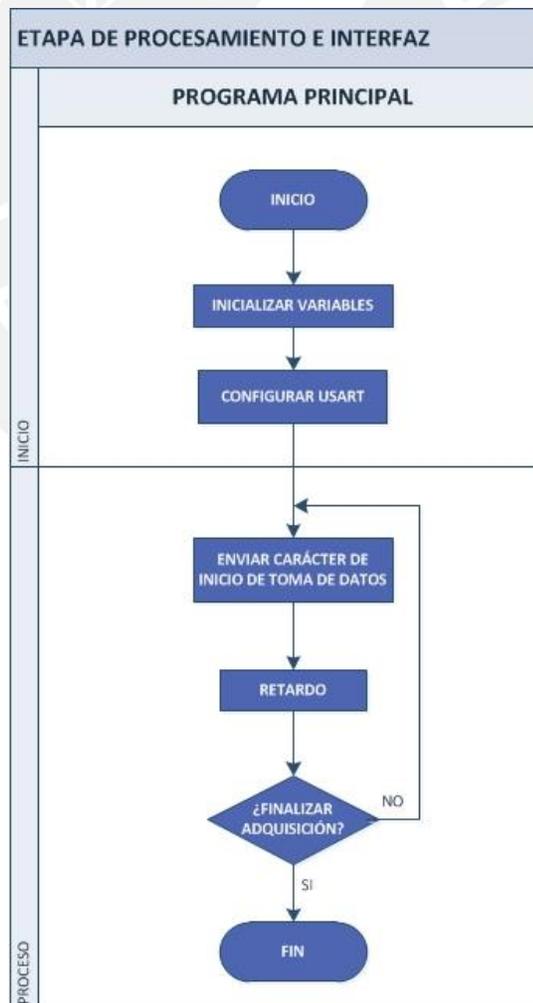


Figura 3.20: Diagrama de flujo del Programa Principal de Procesamiento

Subrutina de Actualización:

Para graficar los parámetros a medir, se hace uso de eventos (*events*) y llamados a función (*callback*) de MATLAB. Los eventos ocurren cuando cierta condición se cumple y esto puede resultar en uno o más llamados a función. En este caso, se hará que cada segundo ocurra un llamado a función donde se actualicen los nuevos datos recibidos [40].

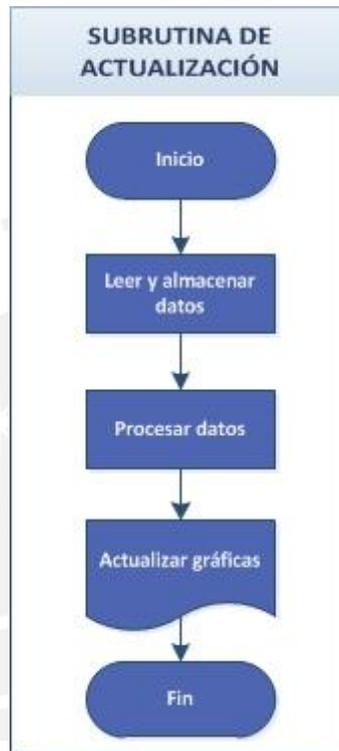


Figura 3.21: Diagrama de flujo de la subrutina de actualización

Como se puede observar en la figura 3.21, se inicia con la lectura y almacenamiento de todos los datos que se recibieron desde la última lectura. Estos son procesados para obtener los datos reales y se actualizan en las respectivas gráficas por cada módulo de medición.

Subrutina de Procesamiento de Datos:

En la figura 3.22, se muestra el diagrama de flujo del procesamiento de los datos recibidos por serial. Estos datos serán interpretados según el protocolo previamente descrito y serán asignados a tablas por cada módulo según la cabecera que corresponda. Con esto, se procede a la conversión de cada una de las variables para obtener los valores reales. Para la aceleración, los datos adquiridos están en cuentas y

se debe hacer la conversión adecuada para obtener los valores en gravedad (unidades: g), tomando en cuenta la resolución y la sensibilidad a la que está programada el acelerómetro. Para los parámetros ambientales, sólo se debe dividir entre 10 el valor adquirido para conseguir el valor real.

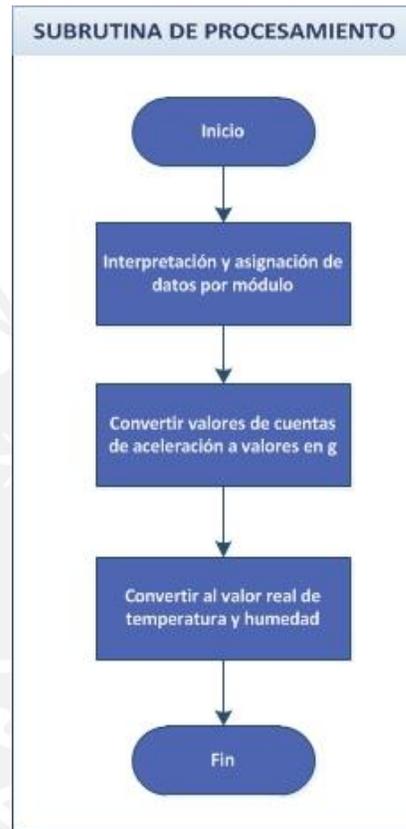


Figura 3.22: Diagrama de flujo de la subrutina de procesamiento de datos

3.2.6.2. Interfaz gráfica de usuario:

Se desarrolló la interfaz gráfica de usuario en la interfaz GUIDE de MATLAB, la interfaz está conformada por cuatro ventanas (principal, tablas de aceleración, tablas de parámetros ambientales y FFT), que se describen a continuación:

Principal:

Es la ventana de inicio de la interfaz, la cual se observa en la figura 3.23. En la sección superior izquierda se ubica un recuadro para ingresar el puerto COM al que se encuentra conectado el módulo coordinador del sistema, el cual es

necesario para la configuración del puerto serial en MATLAB. Los botones que se encuentran en la sección izquierda de la interfaz cumplen las siguientes funciones:

Botón “Iniciar”: Inicia la adquisición de datos en los tres módulos colocados en la estructura y recibe los datos de aceleración, temperatura y humedad. Los datos de aceleración son mostrados en tiempo real (cada segundo) en las gráficas de la sección derecha; mientras que en la sección izquierda, se muestra el último valor de temperatura y humedad obtenidos (adquiridos cada minuto).

Botón “Finalizar”: Al presionar este botón, se finaliza la recepción de datos.

Botón “Tabla P. Ambientales”: Muestra una nueva ventana que corresponde a “Tablas de Parámetros Ambientales” (ver figura 3.23).

Los siguientes botones solo podrán ser utilizados al finalizar la adquisición:

Botón “Tabla de Aceleración”: Muestra una nueva ventana del mismo nombre que el botón (ver figura 3.24).

Botón “Tablas”: Muestra una nueva ventana que posee una tabla con los valores adquiridos de temperatura y humedad (ver figura 3.25).

Botón “FFT”: Muestra una nueva ventana llamada “FFT” (ver figura 3.26), el cual podrá ser utilizado al finalizar el proceso de adquisición

Botón “Salir”: Cierra la interfaz de usuario.



Figura 3.23: Interfaz de usuario – Ventana principal

FFT:

Luego de concluida la adquisición total de los datos, es decir, luego de haber presionado el botón “Finalizar”, se puede presionar el botón “FFT” y obtener las gráficas de la transformada de rápida de Fourier de cada módulo, para de ese modo visualizar la frecuencia fundamental de vibración de la estructura (ver figura 3.26).

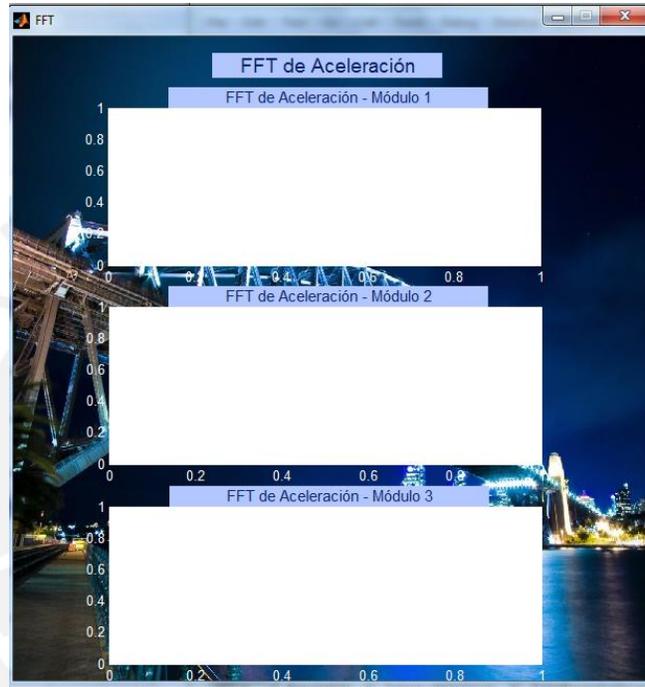


Figura 3.26: Interfaz de usuario – Ventana tablas de FFT

CAPÍTULO 4:

Ensayos

En el presente capítulo, se presentarán los ensayos realizados en el proceso de implementación del Sistema de Monitoreo Estructural diseñado en el capítulo 3, con sus respectivos resultados obtenidos. Los ensayos a realizarse son los siguientes:

- Ensayos de la etapa de sensores
- Ensayos de la etapa de comunicación inalámbrica
- Ensayo de la etapa de control
- Ensayos de la etapa de procesamiento
- Ensayos del sistema completo

4.1. Ensayos de la Etapa de Sensores

Luego de realizar el diseño de los módulos de medición en el capítulo previo y su implementación, se procedió a realizar las pruebas de los sensores seleccionados para verificar que respondían de acuerdo a lo especificado por el fabricante y cumplían con los requerimientos de la presente tesis.

4.1.1 Ensayo del Acelerómetro

Prueba de lectura

Se busca visualizar en un software terminal de puerto serial los valores de aceleración adquiridos. Para llevar a cabo esta prueba, el microcontrolador de la tarjeta del módulo de medición fue programado para leer y enviar los valores de aceleración, los cuales están en unidades de cuentas/g. Adicionalmente, se retiró el módulo XBee de la tarjeta y se conectaron los pines de transmisión y recepción del microcontrolador con un puerto USB de una computadora con ayuda de un dispositivo conversor USB a TTL (ver figura 4.1)



Figura 4.1: Conversor USB a TTL

Se colocó uno de los módulos de medición sobre una mesa aparentemente quieta como se muestra en la figura 4.2 y se procedió a hacer la medición.

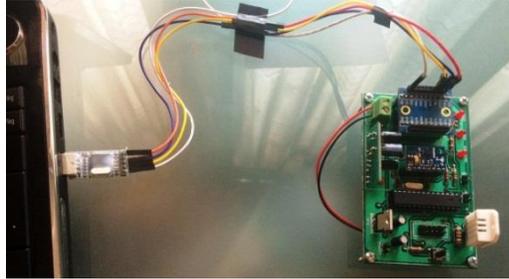


Figura 4.2: Prueba de lectura serial

Debido a la disposición del módulo, este se encuentra sometido a la aceleración de la gravedad (1g) en el eje Z. Esto corresponde a un valor de 4096 cuentas, según especifica la hoja de datos para las condiciones a la que se está trabajando. Como puede observarse en la figura 4.3, los valores obtenidos son muy cercanos a este valor. Sin embargo, no se obtiene el valor teórico exacto debido a que la estructura está sometida a vibraciones imperceptibles al ojo humano.

Por lo tanto, con este ensayo pudo verificarse que se realiza una correcta lectura del acelerómetro, y también, que hay una correcta comunicación serial entre el módulo de medición y la computadora.

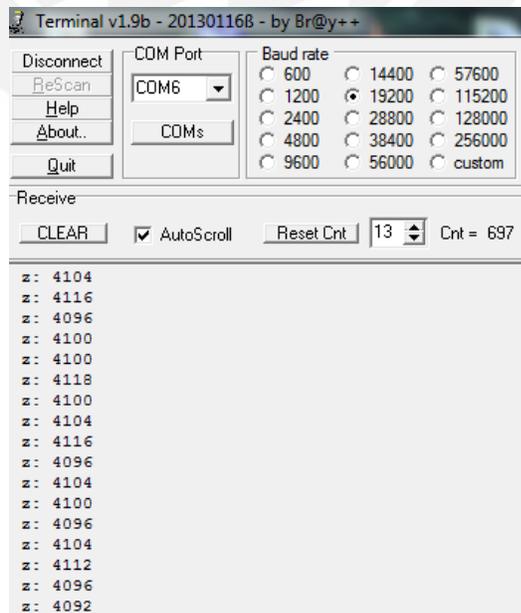


Figura 4.3: Valores de aceleración adquiridos por serial

Calibración

En este ensayo, se busca calibrar el acelerómetro a utilizar (MMA8451Q), para ello, se logró tener acceso al equipo calibrador de vibraciones portable modelo 9100D de la empresa The Modal Shop Inc. [41]. Este equipo posee un acelerómetro interno de referencia con certificación de calibración NIST. Adicionalmente, el equipo posee un *shaker* que vibra a frecuencias y amplitudes constantes configurables con un par de perillas (ver figura 4.4).

Para llevar a cabo la calibración, se colocó la tarjeta del acelerómetro sobre la superficie del agitador (*shaker*) y se fijó con unos pequeños imanes, como se observa en la figura 4.4. Se almacenaron datos de varias pruebas realizadas a distintas frecuencias (10 a 40Hz) y amplitudes (0.15 a 0.9g) y se utilizó el entorno MATLAB para el procesamiento de estos datos.



Figura 4.4: Calibración de acelerómetro

A continuación, una tabla que contiene los valores reales de amplitud (g) configurados en el calibrador 9100D, los valores medidos de amplitud (g), las frecuencias a las que se tomaron las mediciones y el porcentaje de error relativo (tabla 4.1):

Tabla 4.1: Mediciones de aceleración con el equipo calibrador 9100D

	10Hz		15Hz		20Hz		25Hz		30Hz		35Hz		40Hz	
Valor Real (g)	V. Medido (g)	%Error	V. Medido (g)	%Error	V. Medido (g)	%Error	V. Medido (g)	%Error	V. Medido (g)	%Error	V. Medido (g)	%Error	V. Medido (g)	%Error
0.15	0.1642	-9.47%	0.1606	-7.07%	0.1609	-7.27%	0.1546	-3.07%	0.1520	-1.33%	0.1481	1.27%	0.1475	1.67%
0.25	0.2816	-12.64%	0.2569	-2.76%	0.2559	-2.36%	0.2504	-0.16%	0.2401	3.96%	0.2395	4.20%	0.2391	4.36%
0.40	0.4616	-15.40%	0.4307	-7.68%	0.4159	-3.97%	0.4104	-2.60%	0.4100	-2.50%	0.4059	-1.47%	0.4074	-1.85%
0.50	0.5720	-14.40%	0.5404	-8.08%	0.5271	-5.42%	0.5208	-4.16%	0.5191	-3.82%	0.5168	-3.36%	0.5095	-1.90%
0.65	0.7532	-15.88%	0.6913	-6.35%	0.6804	-4.68%	0.6701	-3.09%	0.6618	-1.82%	0.6610	-1.69%	0.6622	-1.88%
0.80	0.9209	-15.11%	0.8478	-5.97%	0.8230	-2.87%	0.8221	-2.76%	0.8103	-1.29%	0.8082	-1.03%	0.8080	-1.00%
0.90	0.9909	-10.10%	0.9614	-6.82%	0.9332	-3.69%	0.9177	-1.97%	0.9141	-1.57%	0.9064	-0.71%	0.9071	-0.79%

Elaboración: Propia

El porcentaje de error relativo fue calculado de la siguiente manera:

$$\%Error\ Relativo = \frac{Valor_{real} - Valor_{medido}}{Valor_{real}}$$

A partir de la tabla 4.1, se elaboró el siguiente gráfico de %Error Relativo vs Frecuencia (ver figura 4.5), para de ese modo visualizar la precisión del acelerómetro dependiendo la frecuencia a la que es sometido a determinadas amplitudes (g). Se colocó en la gráfica los valores absolutos de porcentaje de error relativo.

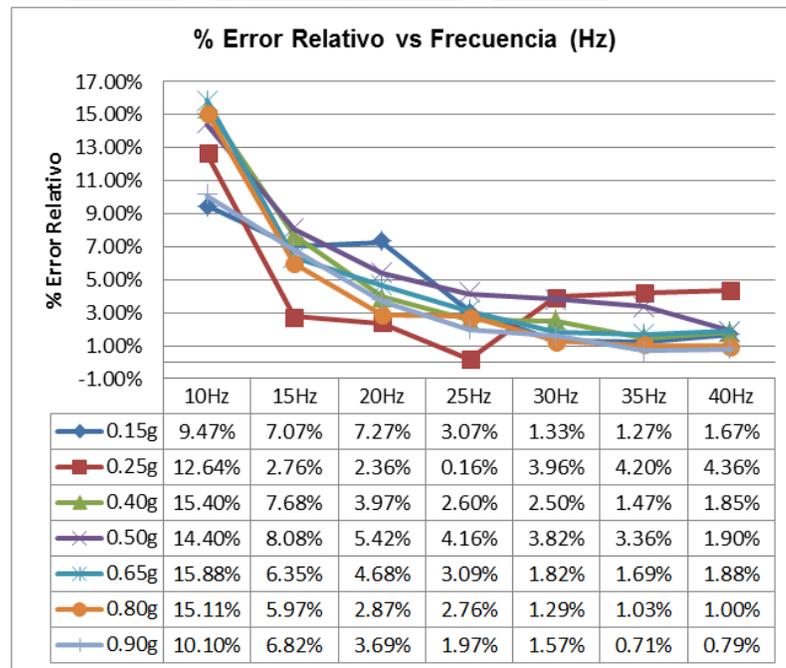


Figura 4.5: Gráfica de %ER vs Frecuencia - Acelerómetro

Del ensayo, se pudo observar que el acelerómetro presenta un porcentaje de error relativo mayor a 9.5% para una frecuencia de 10Hz. Además, se observa que el error en la medición tiende a disminuir con el aumento de la frecuencia. Para frecuencias a partir de 15Hz, se obtiene un porcentaje de error menor al 8.1%. Asimismo, la mejor respuesta del sensor está en el rango de frecuencias entre 25 y 40Hz con errores menores a 4.5%. Por lo tanto, el acelerómetro seleccionado permite obtener mediciones bastante aceptables teniendo en cuenta la relación costo-beneficio respecto a los acelerómetros piezoeléctricos.

4.1.2 Ensayo de Sensor Ambiental

Prueba de lectura

Al igual que en la prueba de lectura del acelerómetro, en este ensayo se busca visualizar los valores de temperatura y humedad en el software terminal de puerto serial bajo las mismas condiciones de ensayo (ver figura 4.2). El microcontrolador estará programado para leer y enviar los valores de humedad y temperatura. Estas pruebas fueron realizadas a condiciones ambientales, obteniéndose los siguientes los valores:

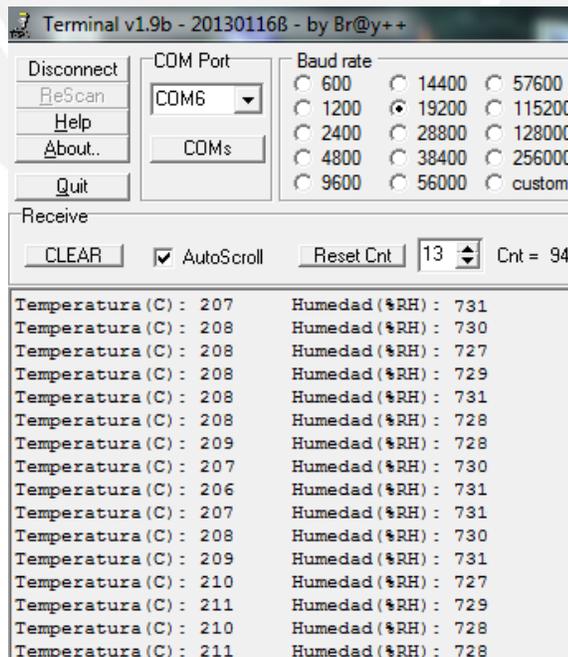


Figura 4.6: Valores de temperatura y humedad adquiridos por serial

En la figura 4.6, se visualizan valores de temperatura y humedad que requieren ser divididos entre 10, lo cual será realizado en la etapa de procesamiento. Teniendo en cuenta esto, los valores obtenidos son coherentes para las condiciones ambientales. Por lo tanto, puede verificarse que la interpretación de la trama es correcta.

Calibración

Para realizar la calibración del sensor ambiental se utilizó el equipo de medición de humedad y temperatura de la empresa Control Company modelo 4187, el cual posee los siguientes rangos de medición:

- Temperatura: (0 a 60)°C $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$
- Humedad: (10 a 100)%HR $\pm 1.5\% \text{HR}$

Como se puede observar, sus rangos de medición y precisión superan los requerimientos del sensor ambiental a utilizarse, por lo tanto, puede ser empleado como patrón de referencia. El equipo posee un interruptor para seleccionar si se desea visualizar temperatura o humedad en la pantalla.

En el presente ensayo se realizó la medición de tres puntos distintos tanto para la temperatura, como para la humedad, colocando el sensor RHT03 al lado del equipo de referencia, como se observa a continuación en la figura 4.7:



Figura 4.7: Calibración de sensor ambiental

A continuación, se muestra los valores obtenidos de las mediciones:

Tabla 4.2: Cuadro comparativo de las mediciones de parámetros ambientales

HUMEDAD (%HR)			TEMPERATURA (°C)		
Valor Patrón (V1)	Valor RHT03 (V2)	Error V1-V2	Valor Patrón (V1)	Valor RHT03 (V2)	Error V1-V2
13.6	13.9	0.3	18.9	19.3	0.4
67.3	65.6	1.7	25.6	25.9	0.3
90.6	88.7	1.9	39.1	38.8	0.3

Elaboración: Propia

Como se puede observar en la tabla 4.2, se tiene un error menor a 2%HR para el parámetro de humedad y menor a 0.5°C para el parámetro de temperatura. Por lo tanto, se comprueba que el sensor ambiental RHT03 cumple con las especificaciones indicadas en su hoja de datos y con los requerimientos de la tesis.

4.2. Ensayos de la Etapa de Comunicación Inalámbrica

En estos ensayos se desea comprobar el correcto funcionamiento de la red ZigBee en configuración punto-multipunto.

4.2.1 Prueba de conectividad

Para comprobar la comunicación entre los nodos que fueron configurados de acuerdo a la tabla 3.4, se conectan los módulos XBee a computadoras utilizando un XBee Explorer por cada uno. Como se puede observar en las ventanas del software X-CTU de la figura 4.8, el coordinador envía un mensaje de “Nodo Coordinador OK”, el cual llega a cada uno de los tres módulos XBee de adquisición. Asimismo, estos envían secuencialmente un mensaje de “Nodo ‘X’ OK”, por lo que se ven tres mensajes en la ventana que corresponde al coordinador. Por lo tanto, se verifica que la configuración de la red punto-multipunto es correcta.

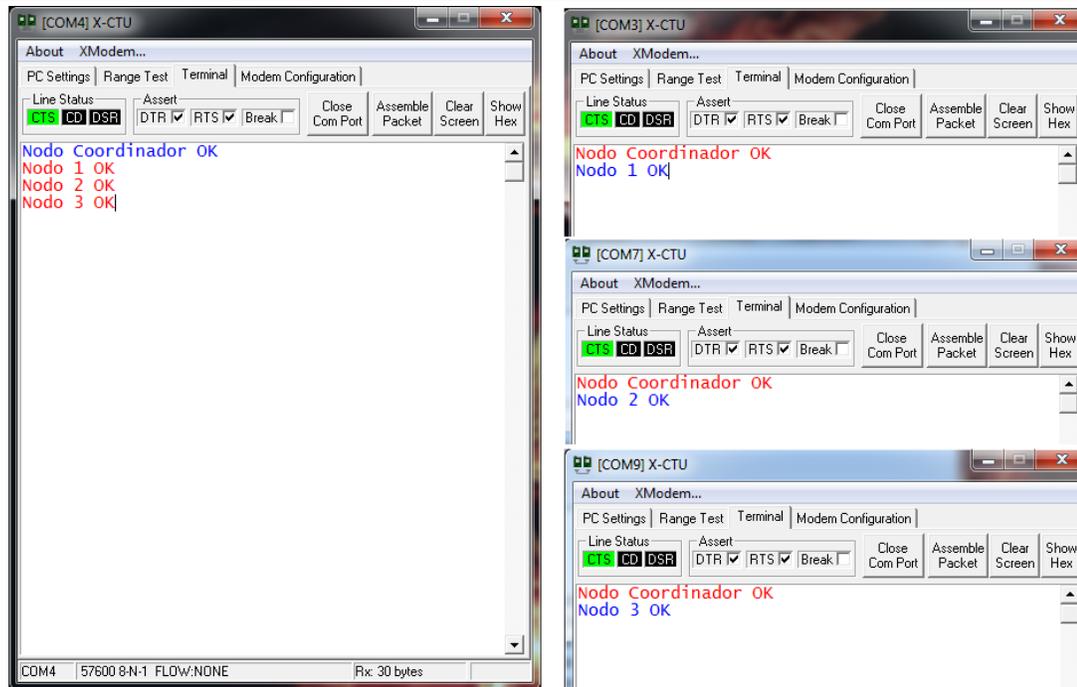


Figura 4.8: Prueba de conectividad. Ventana del coordinador (izquierda) y ventanas de los nodos (derecha)

4.2.2 Prueba de velocidades

Se desea verificar la velocidad máxima de transmisión de la red para la cual no ocurren errores. Para esto, se programa el microcontrolador para que envíe 10000 muestras con un valor fijo de los parámetros de interés. Se hace que el valor de la aceleración sea 8000, la temperatura sea 4000 y la humedad sea 3000. Cabe resaltar que estos valores no están convertidos a sus valores reales, ya que eso corresponde a la etapa de procesamiento. Primero, se configura a la máxima velocidad de transmisión que permite el módulo XBee, lo cual se muestra a continuación:

- Velocidad de transmisión: 115200 baudios
- Número de bits: 8
- Paridad: Ninguna
- Bits de Parada: 1

A continuación, se presentan la tabla con los valores recibidos por la etapa de procesamiento:

	1	2	3
1	8064	3000	4000
2	8128	3000	4000
3	8128	3000	4000
4	8128	3032	4128
5	8064	3064	4064
6	8128	3000	4000
7	8128	3000	4000
8	8128	3128	4064
9	8128	3000	4000
10	8128	3032	4064
11	8128	3000	4032
12	8064	3000	4000

Figura 4.9: Prueba a 115200 baudios por segundo

En la figura 4.9, se muestra una tabla con los valores iniciales recibidos, donde la columna 1 corresponde a la aceleración, la columna 2 a la temperatura y la columna 3 a la humedad. Se comprueba que los valores de cada parámetro presentan errores dado que se está trabajando a la máxima velocidad permitida por los módulos XBee [31].

Dado esto, se procede a reducir la velocidad de transmisión al siguiente valor disponible, con lo que la configuración queda de la siguiente manera:

- Velocidad de transmisión: 57600 baudios
- Número de bits: 8
- Paridad: Ninguna
- Bits de Parada: 1

A continuación, se presentan la tabla con los valores recibidos por la etapa de procesamiento:

	1	2	3
1	8000	3000	4000
2	8000	3000	4000
3	8000	3000	4000
4	8000	3000	4000
5	8000	3000	4000
6	8000	3000	4000
7	8000	3000	4000
8	8000	3000	4000
9	8000	3000	4000
10	8000	3000	4000
11	8000	3000	4000
12	8000	3000	4000

Figura 4.10: Prueba a 57600 baudios por segundo

Como se puede observar en la figura 4.10, los valores recibidos para cada parámetro no presentan errores. Esto comprueba que la configuración utilizada para la transferencia de información en nuestra red de sensores brinda fiabilidad en los datos.

4.2.3 Prueba de distancia

Se desea verificar que se cumple el alcance mínimo requerido por el sistema. Este ensayo se realizará entre un módulo XBee coordinador y un módulo XBee de adquisición. Este último enviará continuamente el mensaje “OK” y se observará en el software X-CTU cuando se detiene la comunicación.

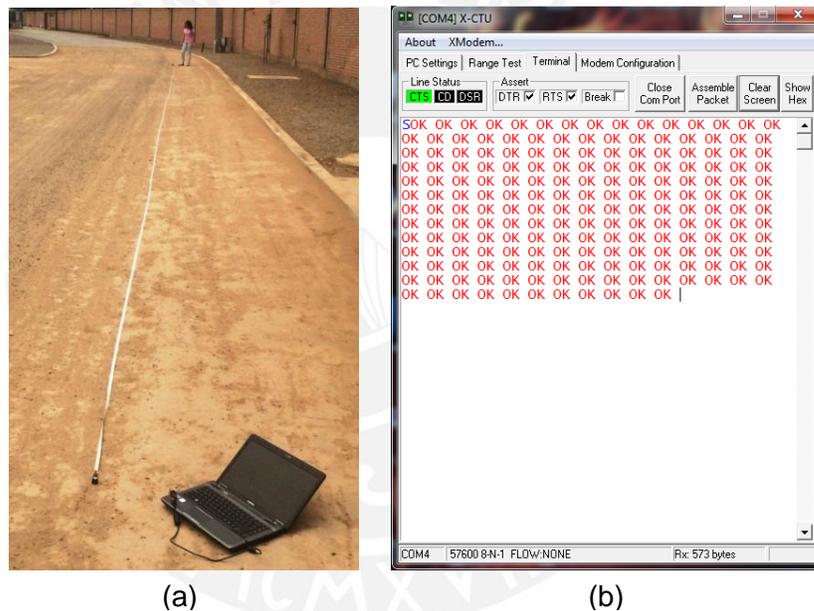


Figura 4.11: Prueba de distancia

En la figura 4.11.a), se aprecia que los módulos están separados una distancia de 30 metros en línea de vista, lo cual corresponde al alcance mínimo requerido por el sistema y como puede observarse en la figura 4.11.b), la transferencia de información entre módulos continúa. Por lo tanto, se comprueba que se cumple con el requerimiento establecido. Adicionalmente, se comprobó que el alcance máximo es de 50m en línea de vista.

4.3. Ensayo de la Etapa de Control

Como se mencionó en el capítulo 3, se tiene un tiempo de retardo en cada módulo de medición antes de la transmisión de los datos para evitar la colisión de información y así conseguir que llegue correctamente al módulo coordinador. Se utiliza el osciloscopio digital modelo DPO 3034 de la marca Tektronix (ver figura 4.12) para medir el tiempo que demora una trama de datos desde que es enviada por el módulo de medición hasta que es completamente recibida por el módulo coordinador.



Figura 4.12: Osciloscopio marca Tektronik modelo DPO3034

Por un lado, se tiene el módulo 1 que cuenta con el acelerómetro y el sensor ambiental. Este envía una trama de 7 bytes. En la figura 4.13, se observa que el tiempo total de esta comunicación es de 3.14 ms. Se le agrega un margen adicional frente a ligeras variaciones del ciclo de reloj, con lo cual se obtiene un tiempo igual a 3.5 ms.

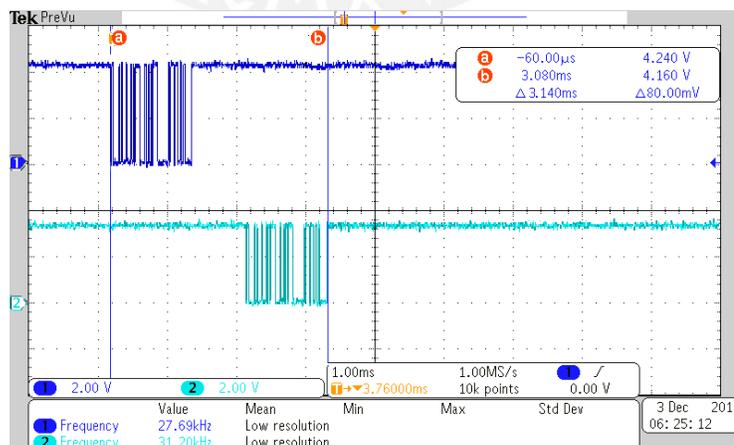


Figura 4.13: Tiempo total de comunicación para 7 bytes

Por otro lado, se tienen los módulos 2 y 3 que sólo cuentan con el acelerómetro. Este envía una trama de 3 bytes. Como se puede observar en la figura 4.14, el tiempo total es de 1.80ms y agregándole un margen adicional se obtiene un tiempo igual a 2 ms.

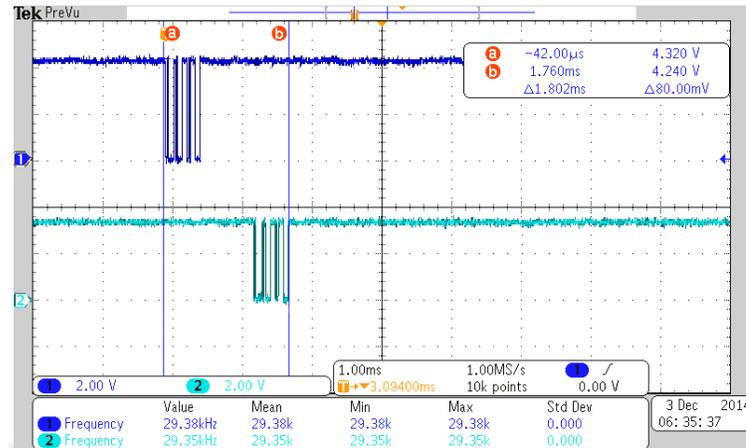


Figura 4.14: Tiempo total de comunicación para 3bytes

Estos tiempos adicionales a la transmisión son generados por el protocolo ZigBee, ya que realiza funciones propias del mismo, como la verificación de que el canal esté libre antes de la transferencia de información, el empaquetado y encriptación de la información, entre otras [42].

Con lo medido anteriormente, se tiene que el módulo 1 no necesita tiempo de retardo porque será el primero en enviar, el módulo 2 tendrá un tiempo de retardo igual a 3.5ms; y el módulo 3, igual a 5.5ms.

4.4. Ensayos de la Etapa de Procesamiento

En esta etapa del proyecto, se requiere utilizar los valores adquiridos de la etapa de control y realizar gráficas para cada módulo que permitan al usuario un mejor estudio e interpretación de los datos. Por ello, se procedió a hacer la adquisición de las variables de interés y obtener las gráficas y tablas deseadas utilizando el entorno MATLAB.

4.4.1. Procesamiento de la aceleración

Como se mencionó en el capítulo 3, los valores de aceleración obtenidos de la etapa de control se encuentran en números binarios en complemento a 2 que representan el número de cuentas. Por eso, es necesario convertirlos a unidades de gravedad (g). Además, se desea obtener sus gráficas respectivas en el dominio del tiempo y la frecuencia. Cabe mencionar que este procedimiento también es utilizado en la calibración del acelerómetro (ver tabla 4.1).

Para estos ensayos, se realizarán pruebas de laboratorio haciendo uso del calibrador de vibraciones portable modelo 9100D (ver figura 4.4). Las condiciones de trabajo a las que se configura el equipo para demostrar el principio de funcionamiento de esta etapa son las siguientes:

- Amplitud: 0.25g
- Frecuencia: 15Hz

Asimismo, se configura la frecuencia de muestreo a 100Hz y se obtiene la gráfica (ver figura 4.15):

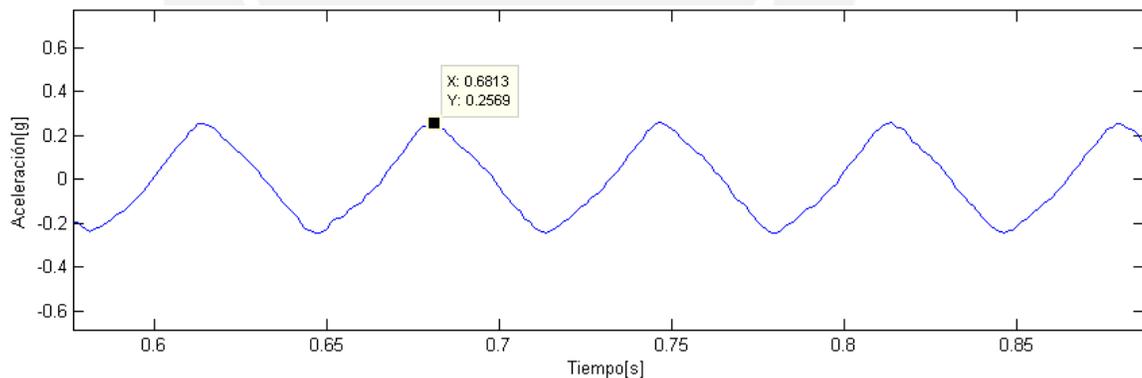


Figura 4.15: Señal de aceleración sensada

Además, se le aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a la señal adquirida, la cual se muestra en la figura 4.16.

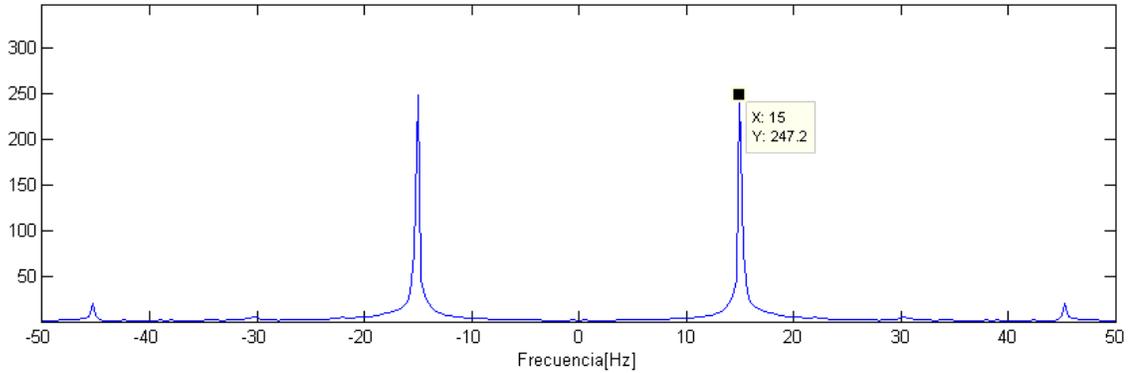


Figura 4.16: FFT de la señal original

Como se observa en la figura 4.15, la señal muestreada corresponde a la vibración generada por el calibrador, la cual debe ser una función sinusoidal pura. La señal adquirida mantiene su comportamiento oscilatorio y se aprecia que cumple con la amplitud de la vibración. Asimismo, dado que el rango de frecuencias de interés es hasta 40Hz, se implementó un filtro digital pasabajos tipo FIR con frecuencia de corte a 50Hz. La señal filtrada se presenta en la figura 4.17.

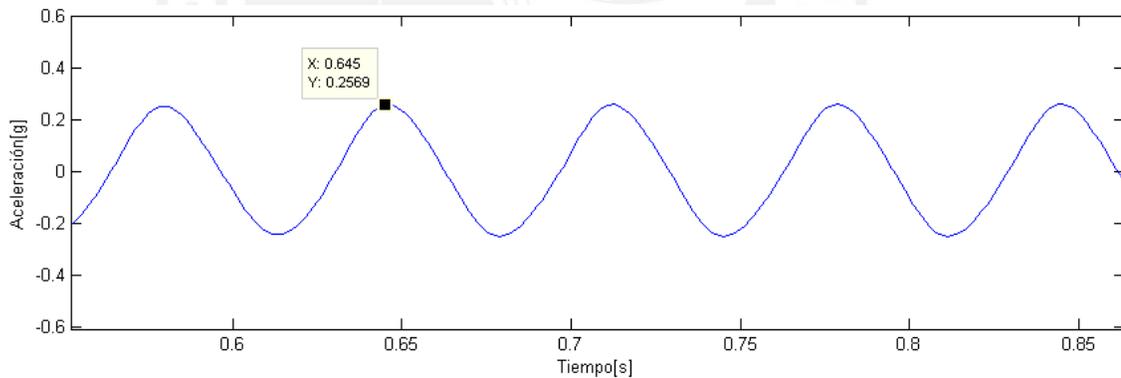


Figura 4.17: Señal de aceleración con filtro FIR

Por último, se le aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a la señal filtrada. En la figura 4.18, se comprueba que se obtiene la frecuencia fundamental de la vibración del calibrador. Además, se puede observar que el pico en la frecuencia de 45Hz ha sido reducido por el filtro aplicado.

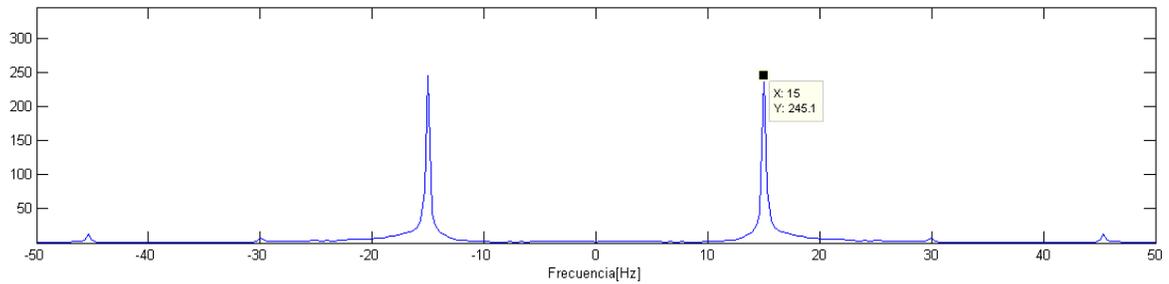


Figura 4.18: FFT de la señal filtrada

4.4.2. Procesamiento de los parámetros ambientales

Los valores de temperatura y humedad obtenidos de la etapa de control son enviados como números enteros y sólo necesitan ser divididos entre 10 para poder obtener el valor real. Para este ensayo, se toman 5 muestras de cada parámetro a una tasa de 1 muestra por minuto. En la figura 4.19, se tiene la tabla con los valores obtenidos, los cuales no presentan mucha variación entre sí, dado que estas variables presentan cambios lentos. Con esto se comprueba que se logran obtener los valores correctos de humedad y temperatura.

	1	2
1	22.9	73.1
2	22.5	73.0
3	22.3	72.8
4	22.6	72.9
5	22.8	73.0

Figura 4.19: Valores adquiridos del sensor ambiental

4.4.3. Sincronización

Para comprobar que la señal de inicio de toma de datos funciona correctamente para la sincronización de los 3 módulos de medición, se mide la diferencia de tiempo en la que esta señal llega a cada uno de los módulos. Para esto, se utiliza un osciloscopio digital (ver figura 4.12) y se conectan 3 canales a los pines de recepción de cada módulo XBee.

De todas las pruebas realizadas, se escogió la que presentaba la máxima diferencia entre los instantes de recepción de la señal de sincronización. Por un lado, en la figura 4.20, se muestra que la diferencia de tiempo entre el módulo 1 y el módulo 2 es de 14.22 μs . Por otro lado, en la figura 4.21, se tiene que la diferencia entre el módulo 1 y el módulo 3 es de 127.2 μs , lo cual corresponde a la máxima diferencia obtenida. Este tiempo es poco significativo frente al período de muestreo de 10 ms (aproximadamente 78 veces menor). Por lo tanto, esta diferencia de tiempos en la recepción puede no ser considerada, con lo cual se comprueba que la señal de sincronización cumple su función y se consigue que la toma de datos ocurra prácticamente en un mismo instante de tiempo.

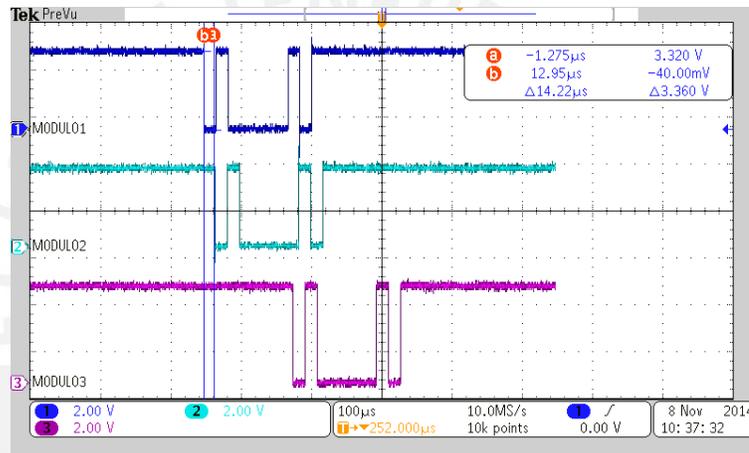


Figura 4.20: Recepción de señal de sincronización – Módulos 1 y 2

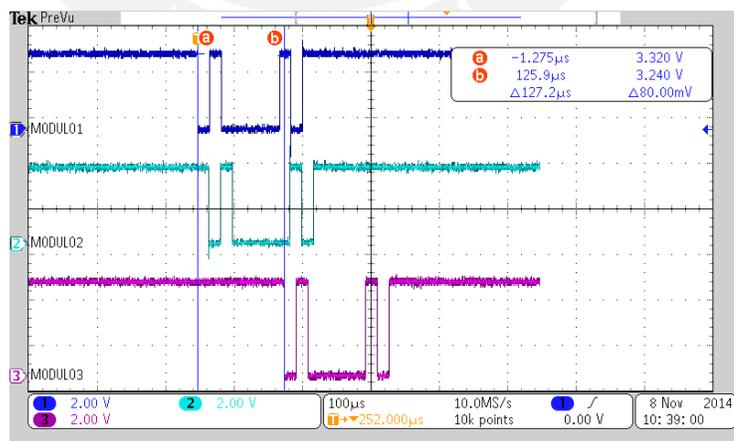


Figura 4.21: Recepción de señal de sincronización – Módulos 2 y 3

4.5. Ensayos del Sistema Completo

El presente ensayo busca probar el principio de funcionamiento del sistema de monitoreo estructural utilizando la interfaz de usuario. Debido a que no se tiene el medio para aplicar una frecuencia de vibración a una estructura y el acelerómetro utilizado no posee la sensibilidad adecuada para registrar las vibraciones ambientales de una estructura, se realizará la prueba distribuyendo los módulos de medición en una mesa sometida a la vibración de un celular, como se observa en la figura 4.22.

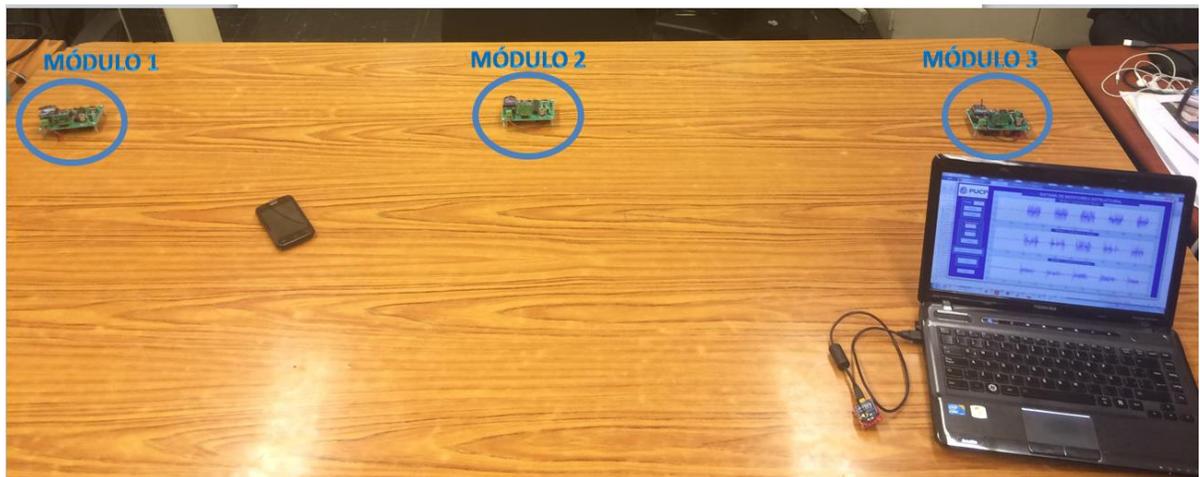


Figura 4.22: Ensayo del sistema de monitoreo

El usuario presiona el botón “Iniciar” para dar inicio a la adquisición de datos en los tres módulos y se empieza a visualizar las gráficas de aceleración en la ventana principal de la interfaz. Como se mencionó en el capítulo 3, las gráficas se actualizarán cada segundo con los datos adquiridos en ese periodo. En la figura 4.23.a) puede observar la gráfica de aceleración obtenida luego de 3 segundos de adquisición; mientras que en la figura 4.23.b) se observan los primeros 6 segundos. Finalmente, en la figura 4.23.c), se muestra la gráfica de los 10 primeros segundos. Además, puede notarse en las figuras antes mencionadas que efectivamente se logra obtener las 100 muestras por segundo de cada módulo de medición.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.23: Interfaz de usuario en funcionamiento

Adicionalmente, en la ventana de interfaz principal, únicamente se visualizan los últimos datos adquiridos de temperatura y humedad y al presionar el botón “Tablas”, se visualiza una nueva ventana con una tabla que contiene todos los valores adquiridos (ver figura 4.24).



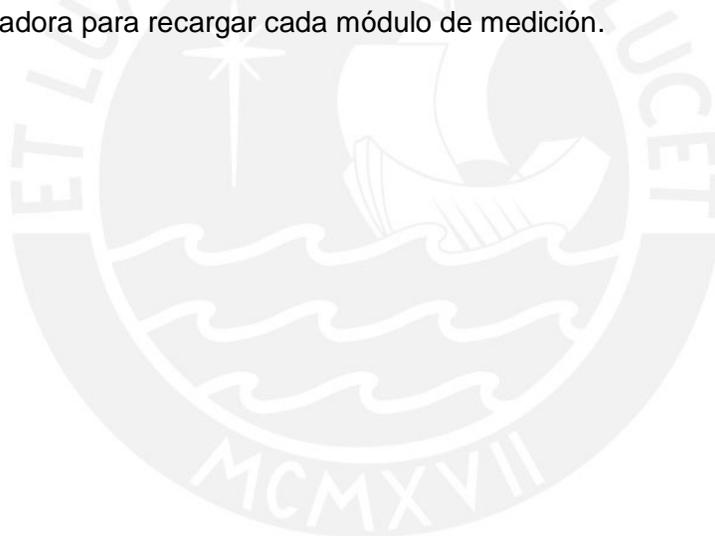
Temperatura (°C)	Humedad (%HR)
22.3	73.1
22.5	73.0
22.3	72.8
22.6	72.9
22.8	73.0
22.5	72.6
22.9	73.1
22.4	72.7
22.8	72.4
22.5	72.9

Figura 4.24: Interfaz de usuario – Tabla de parámetros ambientales

CONCLUSIONES

1. Se logró implementar el sistema de sensado para las vibraciones hasta frecuencias de 40Hz utilizando acelerómetros digitales de tipo MEMS configurados para operar a una tasa de muestreo de 100Hz, un rango de +/-2g y una sensibilidad de 0.25mg. Si bien no se cumplió con el valor de sensibilidad planteado de 0.1mg, se escogió un acelerómetro con especificaciones muy próximas y con un precio económico que permita probar el principio de funcionamiento del sistema. Además, según los ensayos realizados para la calibración del sensor (ver tabla 4.1), este presenta un error menor al 8.1% en el rango de frecuencias de 15 a 40Hz, lo cual representa una buena relación costo-beneficio.
2. Se logró implementar el sistema de sensado para la temperatura y humedad utilizando un sensor ambiental digital que mide ambos parámetros. Para la temperatura, se logra medir en el rango de 0°C a 40°C y para la humedad, en el rango de 50%HR a 100%HR, según lo planteado inicialmente. Además, según los ensayos realizados para la calibración del sensor (ver tabla 4.2), las mediciones están dentro del rango de precisión requerido.
3. Se logró implementar la red de sensores entre el módulo coordinador y los módulos de medición en una configuración punto-multipunto utilizando la tecnología ZigBee. Además, para la trama de datos se implementó un protocolo que incluye una cabecera que indica el módulo al que pertenece la muestra y los parámetros medidos. Sin embargo, se observó que se tienen tiempos adicionales en la transmisión de información (ver figuras 4.13 y 4.14). generadas por las funciones propias de la tecnología ZigBee, como el empaquetado y encriptación de la información, la verificación de que el canal de comunicación esté libre. Asimismo, para evitar la colisión de datos en el módulo coordinador, se agregaron tiempos de retardo en la etapa de control antes del envío de los parámetros, considerando también los tiempos adicionales antes mencionados.

4. Se logró establecer la comunicación entre el módulo coordinador y la computadora utilizando una tarjeta práctica y económica de la empresa Sparkfun. Se configuró a una velocidad de transmisión de 57600 bits por segundo, la cual es la velocidad máxima a la que se puede transmitir sin errores.
5. La interfaz gráfica desarrollada en MATLAB permite visualizar y analizar las señales obtenidas de forma sencilla y dinámica tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.
6. Se logró implementar la fuente de alimentación del sistema con una batería recargable de litio de 3.7V y un regulador con baja caída de voltaje, logrado así un mayor tiempo de vida. Además, se implementó una etapa adicional para cargar la batería mediante un conector USB, pudiendo así utilizar un puerto USB de una computadora para recargar cada módulo de medición.



RECOMENDACIONES

1. Con un mayor presupuesto, se pueden adquirir mejores acelerómetros para mediciones de campo. Se recomienda el uso de acelerómetros piezoeléctricos de alta sensibilidad como los que ofrece la empresa Brüel & Kjær. Sin embargo, esto implica adicionar una etapa de acondicionamiento de señal complicada, que puede ser objeto de una investigación futura.
2. Si bien el entorno MATLAB ofrece funciones que facilitan el uso de operaciones matemáticas para el análisis en el dominio de la frecuencia, las funciones para la comunicación serial no están implementadas de una forma óptima. Por ello, se recomienda el uso del lenguaje C/C++ para la adquisición de datos y desarrollo de interfaz. De esta manera, se podría conseguir una mayor tasa de transferencia de datos.
3. Se considera que para la obtención de un producto final de valor comercial hace falta el desarrollo de un chasis fabricado con un material resistente como el policarbonato o ABS. Además, es recomendable el uso de resina epoxídica que permita el acoplamiento a la estructura de manera rígida.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHANDRAS MUKHOPADHYAY, Subhas
2011 “*New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*”. Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag Berlin Heidelberg
2. MUÑOZ, Julio
1995 “*Sistemas de Seguridad*”. Madrid: Paraninfo.
3. YOUNIS, Mohammad
2011 “*MEMS linear and nonlinear statics and dynamics*”. Boston, MA: Springer Science + Business Media, LLC.
4. RAMOS, Luis y otros
2010 “*Operational Modal Analysis of Historical Constructions Using Commercial Wireless Platforms*”. SAGE Publications Ltd.
5. ACADEMIA DE NETWORKING DE CISCO SYSTEMS
2004 “*Guía del primer año CCNA 1 y 2*”. Madrid: Cisco Systems.
6. BURATTI, Chiara
2011 “*Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems: Distributed Processing, MAC and connectivity*”. Berlin, Heidelberg
7. ORHTMAN, Frank
2003 “*Wi-Fi handbook: building 802.11b wireless networks*”. New York: McGraw-Hill
8. NAVARRO, María
2004 “*Zigbee: Nuevo estándar de tecnología inalámbrica*”. Mundo Electrónico. Barcelona, 2004, Número 359, pp.48-53.
9. PÉREZ, María
2006 “*La Informática, Presente y Futuro en la Sociedad*”. Madrid: Dykinson.

10. GONZALES, Lenart
2006 “Instrumentación en Ingeniería Geotécnica y Estructural”.
Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
de la Universidad de Chile

11. YUNG-BIN, Lin
2010 “Using MEMS Sensors In The Bridge Scour Monitoring System”.
Journal of the Chinese Institute of Engineers. Londres, volumen
33, número 1, pp. 25-35.

12. YANG, Nathan
2010 “Technologies for Structural Test & Monitoring: The Modern
Approach”. AUTOTESTCON, IEEE. Austin, pp.1-5.

13. Acelerómetros – Brüel & Kjær
<<http://www.bksv.es/Products/transducers/vibration/accelerometers>>
Última consulta: 06/09/2014

14. Brüel & Kjær
2012 “Pulse Analyzers and Solutions”. Denmark

15. CROSSBOW TECHNOLOGY
2008 Hoja de datos de la tarjeta MICAz

16. CROSSBOW TECHNOLOGY
2009 Hoja de datos de la tarjeta MTS420

17. CROSSBOW TECHNOLOGY
2009 Hoja de datos de la tarjeta MIB520

18. CROSSBOW TECHNOLOGY
2009 Hoja de datos de la tarjeta Imote2

19. CROSSBOW TECHNOLOGY
2008 Hoja de datos de la tarjeta ITS400

20. CROSSBOW TECHNOLOGY
2007 Hoja de datos de la tarjeta IIB2400

21. LORD MICROSTRAIN SENSING SYSTEMS
2014 Hoja de datos del nodo de medición G-LINK LXRS
22. LORD MICROSTRAIN SENSING SYSTEMS
2013 Hoja de datos del módem WSDA-Base-104-LXRS
23. LECESSSE, Fabio.
2012 “Remote-Control System of High Efficiency and Intelligent Street Lighting Using a Zigbee Network of Devices and Sensor”. Power Delivery, IEEE Transactions. Roma, volume 28, número 1, pp. 21-28
24. AGUILAR VELEZ, Rafael
2010 “Dynamic Structural Identification using Wireless Sensor Network”. Tesis de doctorado en Ingeniería Civil. Portugal: Universidad de Minho. Escuela de Ingeniería
25. FREESCALE SEMICONDUCTOR
2009 Hoja de datos del acelerómetro MMA1260KEG
26. STMICROELECTRONICS
2011 Hoja de datos del acelerómetro LSM303DLHC
27. FREESCALE SEMICONDUCTOR
2013 Hoja de datos del acelerómetro MMA8451Q
28. MAXDETECT
2011 Hoja de datos del sensor de temperatura y humedad RHT03
29. SENSIRION
2014 Hoja de datos del sensor de temperatura y humedad SHT21
30. ROVING NETWORKS
2012 Hoja de datos del módulo bluetooth RN41XV & RN42XV
31. DIGI INTERNATIONAL INC.
2013 Hoja de datos del módulo RF XBee/XBee-PRO DigiMesh 2.4
32. DIGI INTERNATIONAL INC.
2008 Guía de usuario del software X-CTU Configuration & Test Utility
33. VISHAY
2013 Hoja de datos LED ultrabrillante de 5mm

34. ATMEL
2009 Hoja de datos del microcontrolador ATmega328P
35. MICROCHIP
2003 Hoja de datos del microcontrolador PIC16F87XA
36. FREESCALE SEMICONDUCTOR / TUCK, Kimberly
2010 Nota de aplicación AN4075
37. TEXAS INSTRUMENTS
2008 Hoja de datos del regulador de voltaje TPS78233
38. FAIRCHILD SEMICONDUCTOR
2009 Hoja de datos del diodo Schottky RB521S30
39. MICROCHIP
2014 Hoja de datos del integrado cargador MCP73831/2
40. MATHWORKS – MATLAB – “*Events and Callbacks*”
<http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/events-and-callbacks.html>. Última visita: 21/11/2014
41. TMS THE MODAL SHOP, INC
2010 “*Portable Shacker Vibration Calibrator 9100D*”
42. PARALLAX, INC. / HEBEL, Martin; BRICKER, George
2010 “*Getting started with XBee RF Modules*”