

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE UNA
RED DE SENSORES DE MOVIMIENTO TRIDIMENSIONAL PARA
ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCION**



JAIRO IGNACIO TOBAR MUÑOZ

JESÚS MARTÍNEZ ORTEGA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

INGENIERIA FÍSICA

POPAYÁN

2011

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE UNA
RED DE SENSORES DE MOVIMIENTO TRIDIMENSIONAL PARA
ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCION**

**JAIRO IGNACIO TOBAR MUÑOZ
JESÚS MARTÍNEZ ORTEGA**

**DIRECTOR:
JORGE WASHINGTON CORONEL**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
INGENIERIA FÍSICA
POPAYÁN
2011**

Nota de aceptación

Mg. Cesar A. Quinayás B.

Jurado

PhD. Gilberto Bolaños

Jurado

Mg. Jorge Washington Coronel

Director

Fecha de sustentación: Popayán, 8 de Julio de 2011.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE GRÁFICAS	6
INDICE DE TABLAS	8
1. RESUMEN	9
2. INTRODUCCIÓN.....	10
3. MARCO TEORICO.....	11
3.1. VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS.....	11
3.1.1 Esfuerzo.....	12
3.1.1.1 Tipos de esfuerzos.....	12
3.1.1.1.1 Esfuerzo normal	12
3.1.1.1.2 Esfuerzo axial	13
3.1.1.1.3 Esfuerzos cortantes.....	15
3.1.2 Unidades de esfuerzo.....	17
3.1.3. Transductores de medición de vibración.....	17
3.2. ACELEROMETROS.....	18
3.2.1. Tipos de acelerómetros	19
3.2.1.1. Acelerómetro piezo-eléctrico	19
3.2.1.2. Acelerómetro piezo-resistivo.....	20
3.2.1.3. Acelerómetro de galgas extensométricas.....	20
3.2.1.4. Acelerómetro capacitivo.....	21
3.2.1.5. Servo-acelerómetro	22
3.2.2. Acelerómetro MMA7361L	22
3.2.2.1. Características operacionales del acelerómetro MMA7361L.....	25
3.2.2.2. Aplicaciones típicas	26
3.2.2.3. Principio de funcionamiento.....	28
3.2.2.4. Conexiones básicas del acelerómetro.....	29
3.3. COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	32
3.3.1. Tipos de comunicaciones inalámbricas por RF	33
3.3.2. Protocolos de comunicación.....	33

3.3.2.1. Protocolo de comunicación IEEE 802.11.....	34
3.3.2.2. Protocolo IEEE 802.15.4.....	35
3.3.2.3. Estándar ZigBee.....	37
3.3.2.3.1. Características generales y de funcionamiento de ZigBee	37
3.4. Módulos de radiocomunicación Xbee	39
3.4.1. Características.....	39
3.5. USB.....	42
3.5.1. Características.....	43
3.5.2. Tipos de USB	45
3.5.2.1. USB 2.0.....	45
3.5.2.2. USB 3.0.....	46
3.5.3. Velocidades de transmisión	46
3.5.5. Cables y conectores	47
3.6. PIC18LF452.....	49
3.6.1. Características.....	50
3.7. PIC18F4550	51
3.7.1. Características.....	52
3.7.2. Modulo USB del PIC 18F4550	52
4. DISEÑO DEL HARDWARE.....	54
4.1. TARJETA DEL ACELERÓMETRO.....	54
4.2. TARJETA DE RECEPCIÓN E INTERFAZ USB	55
5. DISEÑO DEL SOFTWARE	57
5.1. FIRMWARE (SOFTWARE EMBEBIDO).....	57
5.1.1. Firmware de la tarjeta del acelerómetro.....	57
5.1.2. Firmware de la tarjeta de recepción e interfaz USB	60
5.2. INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO (GUI EN LABVIEW).....	62
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	68
7. APLICACIONES.....	71
8. CONCLUSIONES.....	73
9. BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Figura 1: Esfuerzo normal.....	12
Figura 2: Esfuerzo y deformación uniaxial	13
Figura 3: Esfuerzo y deformación biaxial	13
Figura 4: Esfuerzo y deformación triaxial	14
Figura 5: Esfuerzo y deformación por flexión	14
Figura 6: Esfuerzo y deformación por torsión.....	14
Figura 7: Esfuerzo y deformación combinados	14
Figura 8: Esfuerzo normal.....	15
Figura 9: Esfuerzo cortante.....	15
Figura 10: Esfuerzos cortantes	16
Figura 11: Deformación debida a los esfuerzos cortantes.....	16
Figura 12: Acelerómetro Piezo-eléctrico	19
Figura 13: Acelerómetro piezo-resistivo	20
Figura 14: Acelerómetro de galgas extensométricas	21
Figura 15: Principio de funcionamiento del acelerómetro capacitivo	21
Figura 16: Acelerómetro MMA7361L	22
Figura 17: Celda-g (tomado de Electrocomponentes. S.A.)	23
Figura 18: Esquemáticos de la celda-g	24
Figura 19: Detalle de la celda-g	24
Figura 20: Diagrama de bloques del funcionamiento del acelerómetro	26
Figura 21: Modelo físico simplificado del transductor	29
Figura 22: Distribución de pines del acelerómetro	29
Figura 23: Diagrama de conexión del acelerómetro	30
Figura 24: Diseño PCB (Printed Circuit Board) diseño del circuito impreso.....	31
Figura 25: Aceleración dinámica	31
Figura 26: Aceleración estática.....	32
Figura 27: Tipos de Xbee.....	39
Figura 28: Vista del transceptor de radiofrecuencia Xbee	40

Figura 29: interfaz USB.....	41
Figura 30: Interfaz acoplada con el transceptor.	41
Figura 31: Vista de la ventana del X-CTU.....	42
Figura 32: Diagrama físico del cable USB.....	49
Figura 33: Distribución de pines del PIC18F452	49
Figura 34: Distribución de pines del PIC18F4550	51
Figura 35: Diagrama de conexiones básico para la interfaz USB.....	53
Figura 36: Tarjeta del acelerómetro.	54
Figura 37: Diseño del circuito impreso y su vista previa en 3D	54
Figura 38: Vista inferior de la tarjeta del acelerómetro.	55
Figura 39: tarjeta de recepción e interfaz USB.....	56
Figura 40: Diseño del circuito impreso y su vista previa en 3D.	56
Figura 41: Diagrama de flujo del firmware de la tarjeta del acelerómetro.	58
Figura 42: Diagrama de flujo del firmware de la tarjeta de recepción e interfaz USB.	61
Figura 43: Diagrama de bloques del funcionamiento del funcionamiento del software de la interfaz grafica.	63
Figura 44: Vista general de la interfaz de usuario.	64
Figura 45: Vista de la ventana de aceleración vs tiempo en reposo.....	64
Figura 46: Vista de la ventana de aceleración vs tiempo con perturbación.	65
Figura 47: Vista de la ventana de amplitud vs frecuencia en reposo.....	66
Figura 48: Vista de la ventana de amplitud vs frecuencia con perturbación.	66
Figura 49: Vista de la ventana del modelo tridimensional del ángulo de inclinación en reposo.....	67
Figura 50: Vista de la ventana del modelo tridimensional del ángulo de inclinación con perturbacion.	67
Figura 51: Modelo para pruebas.	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de funcionamiento del acelerómetro MMA7361L	27
Tabla 2: Rangos máximos de funcionamiento del acelerómetro MMA7361L.....	28
Tabla 3: Descripción de pines del acelerómetro MMA7361L	30
Tabla 4: Características más importantes de las versiones del protocolo IEEE 802.11	34
Tabla 5: Propiedades del protocolo IEEE 802.15.4	36
Tabla 6: Tipos de conectores USB	48

1. RESUMEN

A través del empleo de dispositivos programables y un sistema de comunicación por Radio Frecuencia, se conectó un acelerómetro capacitivo de forma inalámbrica, a un computador personal, logrando así, el desarrollo de una robusta plataforma para el análisis cualitativo y cuantitativo de vibraciones en edificaciones.

Se logró el establecimiento de un prototipo funcional de arquitectura en red para la escalabilidad del sistema al permitir conectar fácilmente otros acelerómetros de forma inalámbrica simultáneamente a la misma central.

Y se diseñó e implementó una interfaz gráfica de usuario en el software de instrumentación virtual LabView de National instruments.

2. INTRODUCCIÓN

Los nuevos dispositivos electrónicos con los que se cuenta en el momento, suplen muchas veces necesidades diferentes para las que inicialmente fueron diseñados, también permiten crear nuevos dispositivos aprovechando las bondades que estos nos brindan. Un ejemplo palpable es el caso del acelerómetro, que cada día se implementa en una gran variedad de equipos electrónicos, como juegos, celulares, automóviles, aparatos médicos, etc.

En nuestro caso, hemos visto la oportunidad de implementarlo en un dispositivo con la fusión de una etapa de transmisión por radio frecuencia para el monitoreo y medición de las vibraciones a las que una estructura civil esta sometida, por el efecto de esfuerzos (solicitudes de cargas muertas y/o dinámicas) que debe soportar y para las cuales su diseño puede no haber sido previsto.

Las señales obtenidas pueden ser estudiadas, catalogadas, graficadas, para un estudio posterior o más profundo de sus consecuencias. Con esto se deja abierta la posibilidad futura de optimizar su funcionamiento, simplificar su diseño y aumentar su campo de aplicación.

3. MARCO TEORICO

3.1. VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS

El estudio de las vibraciones se refiere a los movimientos de los cuerpos y a las fuerzas asociadas con ellos. Una vibración mecánica es el movimiento de una partícula o cuerpo que oscila alrededor de una posición de equilibrio. La mayoría de las máquinas y estructuras experimentan vibraciones hasta cierto grado por lo que su diseño requiere la consideración de este efecto dinámico debido a que ocasiona un aumento en los esfuerzos y tensiones.

Una vibración se produce cuando el sistema en cuestión es desplazado desde una posición de equilibrio estable, el sistema tiende a retornar a dicha posición, bajo la acción de fuerzas de restitución elásticas o gravitacionales, moviéndose de un lado a otro hasta alcanzar su posición de equilibrio. El intervalo de tiempo necesario para que el sistema efectúe un ciclo completo de movimiento se llama periodo de vibración, el número de ciclos por unidad de tiempo define la frecuencia y el desplazamiento máximo del sistema desde su posición de equilibrio se denomina amplitud de vibración.

La Medición de Vibraciones, es muy importante en el desarrollo de técnicas para mitigarlas o reducirlas, y en el establecimiento de límites operacionales.

Las causas por las cuales se producen las vibraciones son variadas, para tener una mejor comprensión de ellas se dividen en dos:

- Vibraciones externas, como: Vientos, tráfico automotor y férreo, detonaciones de cualquier tipo y movimientos telúricos.
- Vibraciones internas generadas en el mismo cuerpo del edificio por la presencia de motores, ventiladores, bombas de los equipos instalados, errores de proyecto y/o cargas adicionales a las que se puede ver

sometida la edificación, además de su propia frecuencia natural de vibración.

Dentro del estudio de vibraciones en estructuras es importante tener claros ciertos conceptos:

3.1.1 Esfuerzo

Es la resistencia que ofrece un área unitaria (A) del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa (fuerza, F):

$$Esf = F/A$$

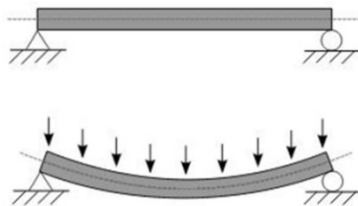
Esfuerzo = fuerza / área

3.1.1.1 Tipos de esfuerzos

3.1.1.1.1 Esfuerzo normal

El esfuerzo normal es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones perpendiculares (normales) a la sección transversal de un prisma mecánico. Este tipo de sollicitación formado por tensiones paralelas está directamente asociado a la tensión normal.

Figura 1: Esfuerzo normal



3.1.1.1.2 Esfuerzo axial

Es aquel debido a fuerzas que actúan a lo largo del eje del elemento.

Los esfuerzos normales axiales por lo general ocurren en elementos como cables, barras o columnas sometidos a fuerzas axiales (que actúan a lo largo de su propio eje), las cuales pueden ser de tensión o de compresión. Además de tener resistencia, los materiales deben tener rigidez, es decir tener capacidad de oponerse a las deformaciones (d) puesto que una estructura demasiado deformable puede llegar a ver comprometida su funcionalidad y obviamente su estética.

Dependiendo de la forma cómo actúen las fuerzas externas, los esfuerzos y deformaciones producidos pueden ser axiales, biaxiales, triaxiales, por flexión, por torsión, o combinados, como se muestra en las figuras 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

Figura 2: Esfuerzo y deformación uniaxial

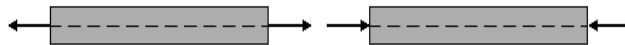


Figura 3: Esfuerzo y deformación biaxial

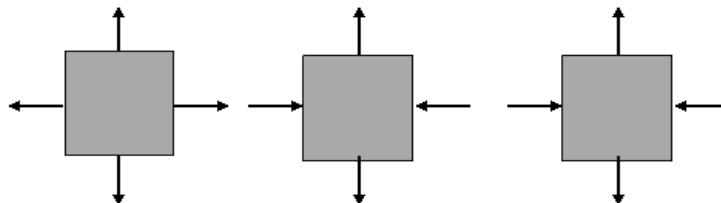


Figura 4: Esfuerzo y deformación triaxial

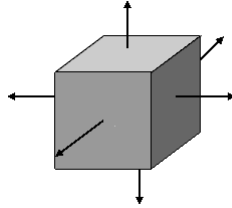


Figura 5: Esfuerzo y deformación por flexión

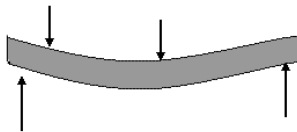


Figura 6: Esfuerzo y deformación por torsión

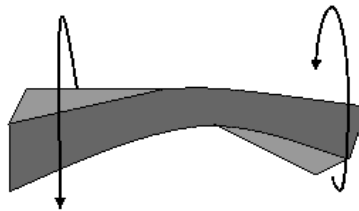
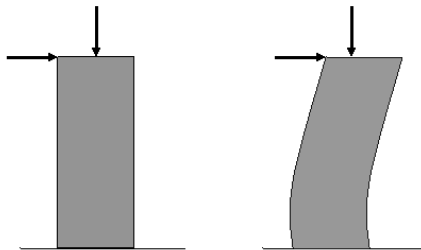


Figura 7: Esfuerzo y deformación combinados



Dependiendo de que la fuerza interna actúe perpendicularmente o paralelamente al área del elemento considerado los esfuerzos pueden ser normales (fuerza perpendicular al área), cortantes (tangenciales o de cizalladura, debido a una fuerza paralela al área), como se muestra en las figuras 8 y 9.

Figura 8: Esfuerzo normal



Figura 9: Esfuerzo cortante



3.1.1.1.3 Esfuerzos cortantes

Las fuerzas aplicadas a un elemento estructural pueden inducir un efecto de deslizamiento de una parte del mismo con respecto a otra. En este caso, sobre el área de deslizamiento se produce un esfuerzo cortante, o tangencial, o de cizalladura (figura 10). Análogamente a lo que sucede con el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante se define como la relación entre la fuerza y el área a través de la cual se produce el deslizamiento, donde la fuerza es paralela al área. El esfuerzo cortante (τ) se calcula como:

Esfuerzo cortante = fuerza / área donde se produce el deslizamiento

$$\tau = F/A$$

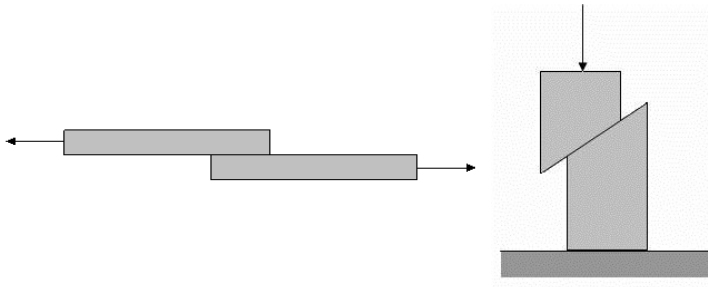
donde,

τ : es el esfuerzo cortante

F: es la fuerza que produce el esfuerzo cortante

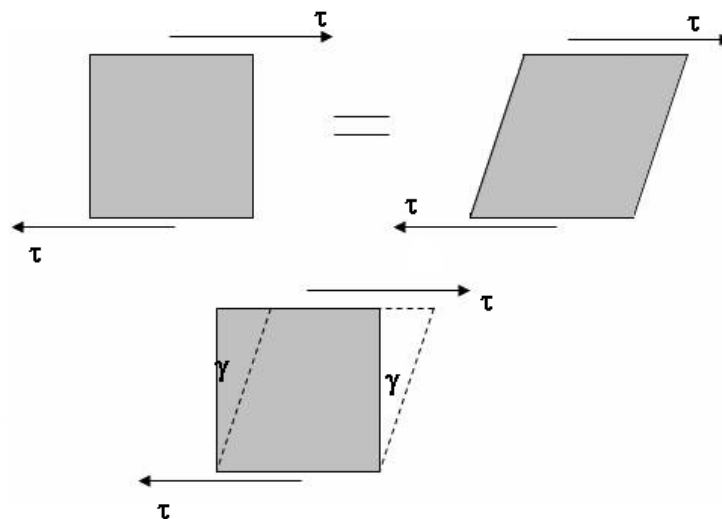
A: es el área sometida a esfuerzo cortante

Figura 10: Esfuerzos cortantes



Las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes, no son ni alargamientos ni acortamientos, sino deformaciones angulares, como se muestra en la figura 11:

Figura 11: Deformación debida a los esfuerzos cortantes



3.1.2 Unidades de esfuerzo

La unidad de esfuerzo en el sistema internacional es el Pascal, mientras que en el sistema inglés, es el psi; estas unidades se definen como:

Pascal (Pa): se define como la relación entre un kN y un m². Se utilizan prefijos, entonces se encuentra el megapascal (MPa) y el kilopascal (kPa).

psi :se define como la relación entre una libra y una pulgada cuadrada. Se utiliza también el ksi (1000 psi). ^[1]

3.1.3. Transductores de medición de vibración

Los transductores de vibración son empleados para medir la velocidad lineal, desplazamiento, proximidad, y también la aceleración de sistemas sometidos a vibración. En general, los transductores empleados en el análisis de vibración, convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual esta en función de la vibración.

A continuación se muestran los diferentes tipos de transductores usados para la medición de vibraciones:

- Transductores de Aceleración
 - Acelerómetros
- Transductores de desplazamiento
 - LVDTs
 - Corriente Eddy
 - Capacitivos
- Transductores de velocidad
 - Vibrómetros Láser

3.2. ACELEROMETROS

La **aceleración** es una magnitud vectorial que relaciona el cambio de la velocidad y el tiempo en que este se produce, es decir, mide que tan rápido es el cambio de velocidad. Sus dimensiones son [Longitud]/ [Tiempo]²; Sus unidades en el sistema internacional son m/s².

Matemáticamente se denota mediante:

$$a = \frac{V_f - V_i}{t_f - t_i}$$

Un **acelerómetro** es un instrumento de medida que proporciona lecturas de la variación de la aceleración en el tiempo.

El fundamento del acelerómetro es un sistema de masas (masa sísmica) y resortes. La tensión y la fuerza en los resortes es descrita por la ley de Hooke. Esta ley propone: “la fuerza de resistencia o la fuerza para establecer la posición de equilibrio en un resorte, es proporcional a la cantidad de fuerza al estirarlo o comprimirlo.”

$$F = k \cdot x$$

Además de la ley de Hooke, los acelerómetros también están basados en la segunda ley de Newton que relaciona la fuerza con masa y aceleración. Esto implica que un sistema acelerado producirá una fuerza de acuerdo a la relación

$$F = m \cdot a$$

Luego,

$$F = m \cdot a = k \cdot x$$

La fuerza hace que el resorte en el acelerómetro (o materia elástica), se expanda o se comprima. Nótese que la aceleración ocurre solo en un sentido y por lo tanto para conseguir medidas de aceleración en múltiples ejes el sistema debe ser duplicado a lo largo de cada uno de los ejes requeridos. ^[5]

3.2.1. Tipos de acelerómetros

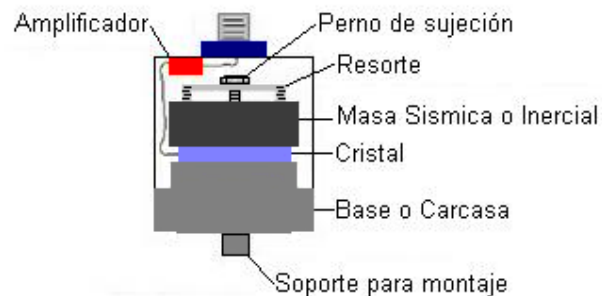
Los acelerómetros más comunes son: piezo-eléctricos, piezo-resistivos, acelerómetro de galgas extensométricas, capacitivos y servo acelerómetros.

3.2.1.1. Acelerómetro piezo-eléctrico

El funcionamiento de este tipo de acelerómetros se basa en las propiedades de los cristales piezo-eléctricos. Estos cristales cuando son sometidos a alguna fuerza como compresión, flexión o extensión, producen una corriente eléctrica; la palabra piezo de origen griego significa “apretar”.

Si se coloca, un cristal de este tipo entre una carcasa (es decir el objeto al cual se quiere medir la aceleración) y una masa inercial, cuando se produzca una aceleración, la masa ejercerá una fuerza sobre el cristal que producirá una corriente; al medir esta corriente se puede determinar la aceleración.

Figura 12: Acelerómetro Piezo-eléctrico

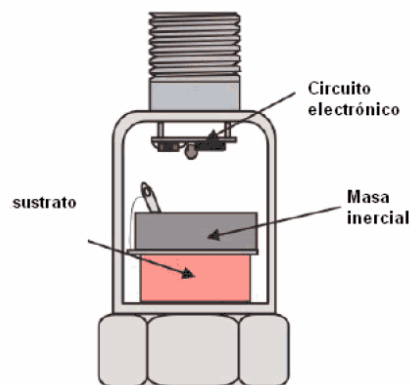


Se observa el principio de funcionamiento de un Acelerómetro Piezo-Eléctrico.

3.2.1.2. Acelerómetro piezo-resistivo

El Acelerómetro piezo-resistivo a diferencia del piezo-eléctrico utiliza un sustrato en lugar de un cristal piezo-eléctrico, en esta tecnología, la fuerza que ejerce la masa sobre el sustrato varían su resistencia, que forma parte de un circuito, mediante un puente de Wheatstone, se mide la intensidad de la corriente.

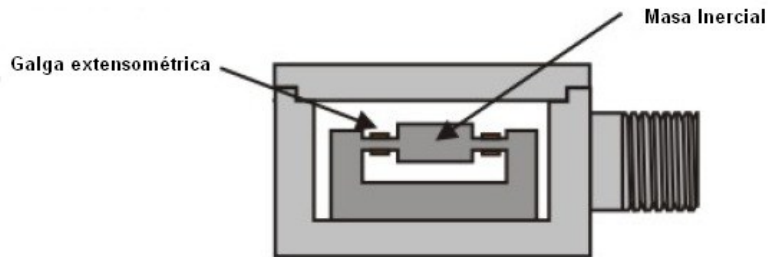
Figura 13: Acelerómetro piezo-resistivo



3.2.1.3. Acelerómetro de galgas extensométricas

En este tipo de Acelerómetro una (o más) galgas extensométricas, hacen de puente entre la carcasa del instrumento y la masa inercial, la aceleración produce una deformación de la galga, que se traduce en una variación de corriente detectada por un puente de Wheatstone, la deformación, es directamente proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro. Al igual que en el piezo-resistivo la respuesta de frecuencia llega hasta los cero Hz.

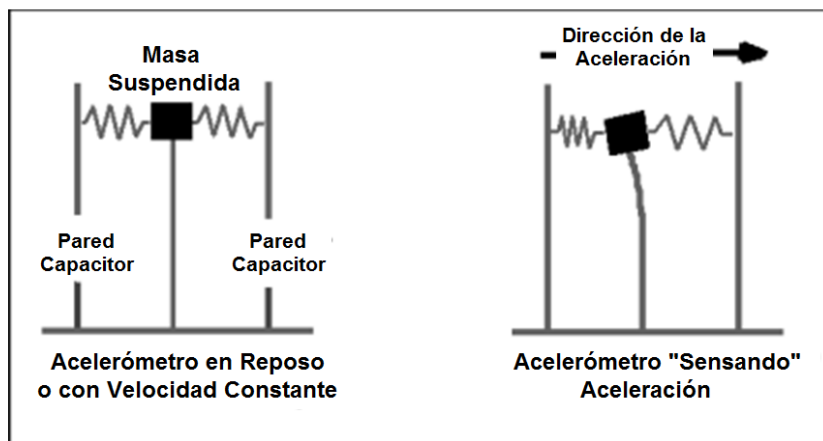
Figura 14: Acelerómetro de galgas extensométricas



3.2.1.4. Acelerómetro capacitivo

En este tipo de Acelerómetro, el elemento que conecta la masa inercial con la carcasa es un condensador. Una de las paredes está fija, pegada a la carcasa y la otra a la masa. Cuando ocurre una aceleración la masa presiona el condensador, variando el grosor entre pared y pared. Midiendo la capacitancia del condensador se puede calcular la aceleración. Este tipo de acelerómetros son extremadamente resistentes, pueden soportar aceleraciones de 30000 G. [1].

Figura 15: Principio de funcionamiento del acelerómetro capacitivo



3.2.1.5. Servo-acelerómetro

Este es un dispositivo para medir la aceleración angular. El dispositivo cuya aceleración de giro vamos medir se conecta a un péndulo. Cuando gira dicho elemento el péndulo lo hace con él. Un sensor de posición capta el movimiento del péndulo y mediante un circuito electrónico se compara la señal del sensor de posición con una señal de referencia. Entonces un motor de rotación aplica una fuerza al péndulo determinada por ese circuito electrónico y que hace girar al péndulo en sentido opuesto al del elemento. La posición en la que se detiene el péndulo es proporcional a la aceleración inicial aplicada.

Estos sensores pueden medir aceleraciones de hasta 1000 radianes por segundo al cuadrado y con precisiones muy elevadas.

Aplicaciones: Control de velocidad y posición en trenes, aviones y otros vehículos. ^[2].

3.2.2. Acelerómetro MMA7361L

Figura 16: Acelerómetro MMA7361L



Los acelerómetros son dispositivos diseñados para detectar cambios en la fuerza resultante de: caídas, inclinación, movimiento, posición, golpes y vibraciones.

Freescall cuenta con tres gamas de acelerómetros para detectar estos cambios: g baja (entre 0g a 20g), g intermedias (entre 20g a 100g) y g alta (100g hasta 500g).

Los avances en el campo de los semiconductores están dando lugar a circuitos integrados con características tridimensionales e incluso con piezas móviles. Estos circuitos integrados se denominan Sistemas Micro electromecánicos (MEMS) y pueden utilizarse para resolver aplicaciones no previstas para dispositivos basados en microcontroladores. La tecnología MEMS puede aplicarse utilizando un sin número de diferentes materiales y técnicas de fabricación; la elección dependerá del tipo de dispositivo que se está creando y el sector comercial en el que tiene que operar.

Por lo general, un acelerómetro está compuesto por dos dispositivos dentro del mismo chip, por un lado la celda-g, encargada de medir la aceleración y por otro el circuito de control que brinda las prestaciones del chip, en la actualidad estos chips son capaces de medir 1, 2 o los 3 ejes en el mismo encapsulado.

Figura 17: Celda-g (tomado de Electrocomponentes. S.A.)

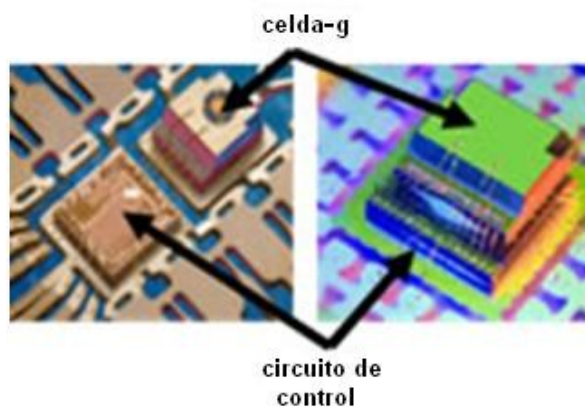
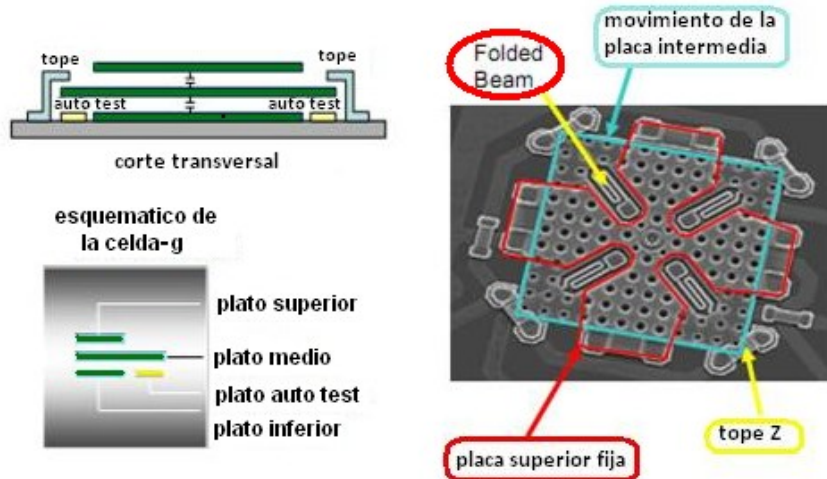


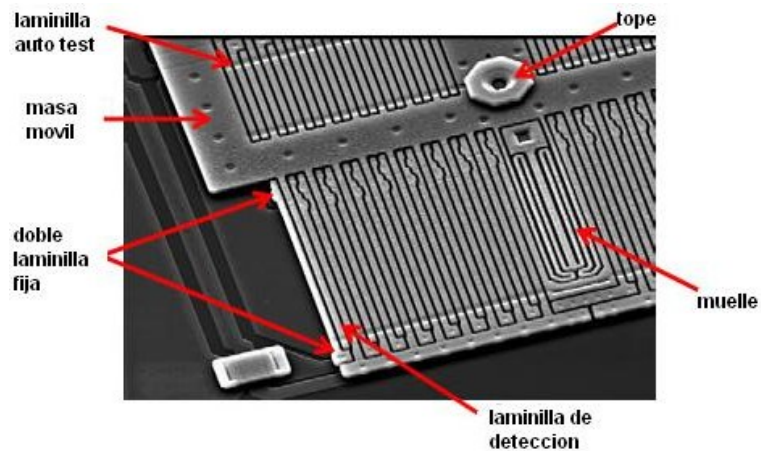
Figura 18: Esquemáticos de la celda-g



La Celda-g es una superficie micromecanizada para detección capacitiva, existen dos tipos:

- La celda-g para eje Z.; esta celda se puede considerar como una superficie elástica, donde en la medida que la misma percibe aceleración, la superficie se mueve en función de la aceleración recibida. Esta variación de capacidad, es procesada por el acelerómetro, el cual convierte la misma en un valor de tensión proporcional a la aceleración.

Figura 19: Detalle de la celda-g



- La celda-g de tecnología X-lateral, esta compuesta por una masa móvil y dos pares de laminillas fijas. Cada par de laminillas forma dos capacitores, en la medida que la masa central se mueve con la aceleración, la distancia entre las laminillas cambia, lo cual genera un cambio en la capacitancia, esta variación es convertida a tensión de forma proporcional a la aceleración aplicada. ^[3].

3.2.2.1. Características operacionales del acelerómetro MMA7361L

- Es un acelerómetro analógico de 3 ejes de $\pm 1.5g$ - 6g.
- Sensitividad seleccionable (1.5g / 6g)
- Bajo consumo 400 mA
- Modo de bajo consumo 3 μA
- Alta sensibilidad (800 mV/g a 1.5g)
- Voltaje de operación 2.2 - 3.6V.
- Empaque LGA-14, dimensiones 3mm x 5mm x 10mm.
- Tiempo de respuesta (0.5 ms)
- Prueba de caída libre auto detección de diagnostico
- 0g Detección de Protección Caída libre
- Acondicionamiento de señal con filtro pasa bajo
- Diseño robusto, para protección contra colisiones
- Se rige bajo la norma RoHS ("Restriction of Hazardous Substances"), Restricción de ciertas Sustancias Peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos
- Producto ambiental
- Bajo costo

3.2.2.2. Aplicaciones típicas

- Juegos 3D: inclinación y detección de movimiento, grabador de eventos
- PC portátil, reproductor de mp3: Detección de caída libre, Antirrobo
- Teléfono celular: Estabilidad de imagen, texto de desplazamiento, marcado movimiento
- Podómetro: detección de movimiento
- PDA, detección de desplazamiento
- Navegación y fin de ruta: E-Brújula compensación de inclinación
- Robótica: detección de movimiento

Figura 20: Diagrama de bloques del funcionamiento del acelerómetro

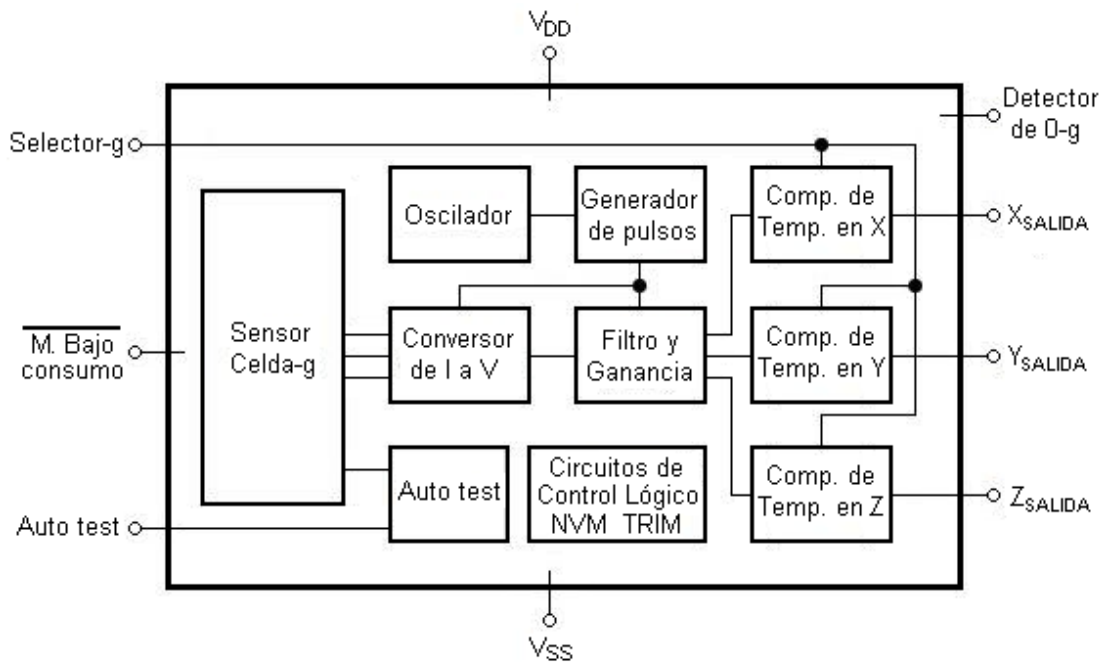


Tabla 1: Características de funcionamiento del acelerómetro MMA7361L

A menos que se indique lo contrario: $-40\text{ °C} \leq T_A \leq 85\text{ °C}$, $2.2\text{V} \leq V_{DD} \leq 3.6\text{V}$, Aceleración=0g. Salida de carga. ⁽¹⁾

CARACTERISTICAS	SIMBOLO	MINIMO	TIPICO	MAXIMO	UNIDAD
Rango de operación⁽²⁾					
Suministro de de voltaje ⁽³⁾	V_{DD}	2.2	3.3	3.6	V
Suministro de corriente ⁽⁴⁾	I_{DD}	—	400	600	μA
Suministro de corriente en bajo consumo ⁽⁴⁾	I_{DD}	—	3	10	μA
Rango de temperatura	T_A	-40	—	+85	$^{\circ}\text{C}$
Rango de aceleración ejes X, Y y Z					
Selector- g: 0	g_{FS}	—	± 1.5	—	g
Selector- g: 1	g_{FS}	—	± 6.0	—	g
Señal de salida					
Cero-g($T_A=25\text{ °C}$, $V_{DD}=3.3\text{V}$) ^{(5),(6)}	V_{OFF}	1.485	1.65	1.815	V
Cero-g ⁽⁴⁾	V_{OFF}, T_A	-2.0	± 0.5	+2.0	mg/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitividad ($T_A=25\text{ °C}$, $V_{DD}=3.3\text{V}$)					
1.5g	$S_{1.5g}$	740	800	860	mV/g
6g	S_{6g}	190.6	206	221.5	mV/g
Sensitividad ⁽⁴⁾	S, T_A	-0.0075	± 0.002	+0.0075	%/ $^{\circ}\text{C}$
Ancho de banda					
XY	f_{-3dBXY}	—	400	—	Hz
Z	f_{-3dBZ}	—	300	—	Hz
Impedancia de salida	Z_0	—	32	—	K Ω
Detector -0g	$0g_{detector}$	-0.4	0	+0.4	g
Auto test					
Respuesta de salida					
X_{SALIDA}, Y_{SALIDA}	Δg_{STXY}	+0.05	-0.1	—	g
Z_{SALIDA}	Δg_{STZ}	+0.8	+1.0	+1.2	g
Entrada en bajo	V_{IL}	V_{SS}	—	$0.3V_{DD}$	V
Entrada en alto	V_{IH}	$0.7V_{DD}$	—	V_{DD}	V
Densidad espectral de P. RMS (0.1Hz-1KHz) ⁽⁴⁾	ρ_{DEP}	—	—	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Control de tiempo					
Tiempo de encendido ⁽⁷⁾	$t_{RESPUESTA}$	—	1.0	2.0	ms
Tiempo de habilitación ⁽⁸⁾	$t_{HABILITACION}$	—	0.5	2.0	ms
Tiempo de auto test ⁽⁹⁾	t_{AT}	—	2.0	5.0	ms
Detección de resonancia					
XY	$f_{celda-gXY}$	—	6.0	—	KHz
Z	$f_{celda-gZ}$	—	3.4	—	KHz
Frecuencia interna de muestreo	f_{RELOJ}	—	11	—	KHz
Grado de rendimiento de salida					
Rango de salida a máx. escala ($I_{SALIDA}=3\mu\text{A}$)	V_{RSME}	$V_{SS}+0.1$	—	$V_{DD}-0.1$	V
No linealidad, $X_{SALIDA}, Y_{SALIDA}, Z_{SALIDA}$	NL_{SALIDA}	-1.0	—	+1.0	%RSME
Sensitividad en el cruce de ejes ⁽¹⁰⁾	$V_{XY,XZ,YZ}$	-5.0	—	+5.0	%

Tabla 2: Rangos máximos de funcionamiento del acelerómetro MMA7361L

Límites a los que el dispositivo puede estar expuesto sin causar daño permanente.

RANGO	SIMBOLO	VALOR	UNIDADES
Aceleración máx. en todos los ejes	gmax	±5000	G
Voltaje de alimentación	V _{DD}	-0.3 to +3.6	V
Test de caída	Ddrop	1.8	M
Rangos de temperatura	Tstg	-40 to +125	°C

3.2.2.3. Principio de funcionamiento

El dispositivo consta de una superficie micromecanizada con celdas de detección capacitiva (celdas g) y una señal de acondicionamiento de ASIC (Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas) contenida en un solo paquete.

El elemento de detección micromecanizado se encuentra dentro de un par de láminas selladas herméticamente.

La celda-g es una estructura mecánica formada a partir de materiales semiconductores (polisilicio) utilizando procesos (de enmascaramiento y grabado). Se puede modelar como un conjunto de columnas fijas con una masa central que se puede mover entre ellas. Las columnas pueden ser sacadas de su posición de reposo al someter el sistema a una aceleración (Figura 21); la medida de su desplazamiento determina la aceleración.

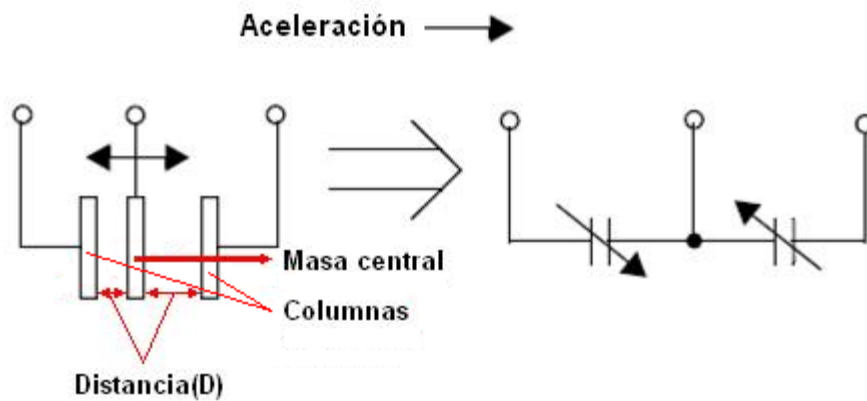
Las columnas y la masa central forman dos condensadores “back-to-back” (Figura 21).

A medida que la masa central se desplaza, varia la capacitancia de la siguiente manera; $C = A\epsilon / D$; Donde A es el área de la columna, ϵ es la

constante dieléctrica, y D es la distancia entre las columnas y la masa central.

El ASIC utiliza técnicas de conmutación entre los condensadores para medir las capacitancias de las celdas g-y extraer los datos de aceleración de la diferencia entre los dos condensadores. El ASIC también realiza acondicionamientos y filtrado de la señal, con lo cual entrega un voltaje de salida de nivel alto que es proporcional a la aceleración. [4].

Figura 21: Modelo físico simplificado del transductor



3.2.2.4. Conexiones básicas del acelerómetro

Figura 22: Distribución de pines del acelerómetro

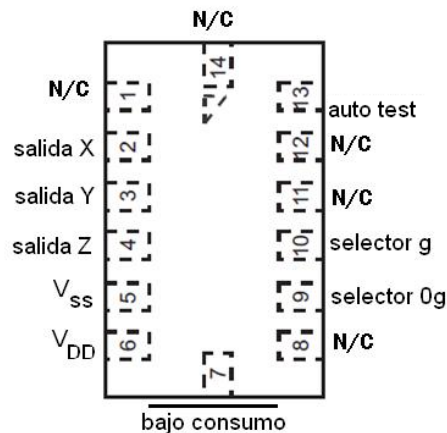


Tabla 3: Descripción de pines del acelerómetro MMA7361L

PIN	NOMBRE DEL PIN	DESCRIPCION
1	N/C	Sin conexión interna , se deja libre
2	XOUT	Voltaje de salida del eje X
3	YOUT	Voltaje de salida del eje Y
4	ZOUT	Voltaje de salida del eje Z
5	VSS	Tierra
6	VDD	Voltaje de entrada
7	$\overline{\text{Sleep}}$	Pin de entrada lógica para modo de espera
8	NC	Sin conexión interna , se deja libre
9	0g-Detect	señal de salida lógica digital de Caída libre
10	g-Select	Pin de entrada lógica para selección de g
11	N/C	Sin conexión interna , se deja libre
12	N/C	Sin conexión interna , se deja libre
13	Self Test (Auto Test)	Pin para iniciar el auto-test
14	N/C	Sin conexión interna , se deja libre

Figura 23: Diagrama de conexión del acelerómetro

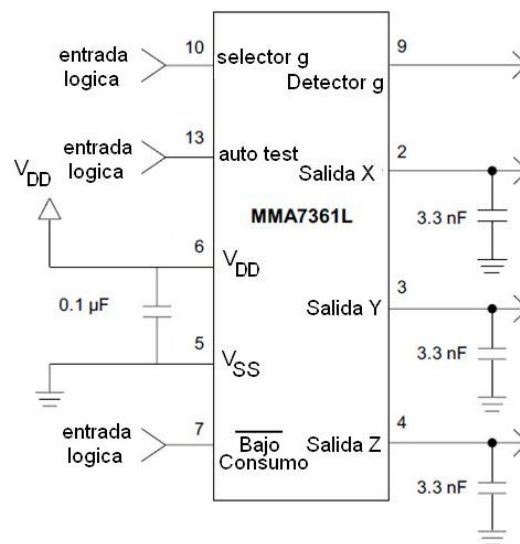


Figura 24: Diseño PCB (Printed Circuit Board) diseño del circuito impreso.

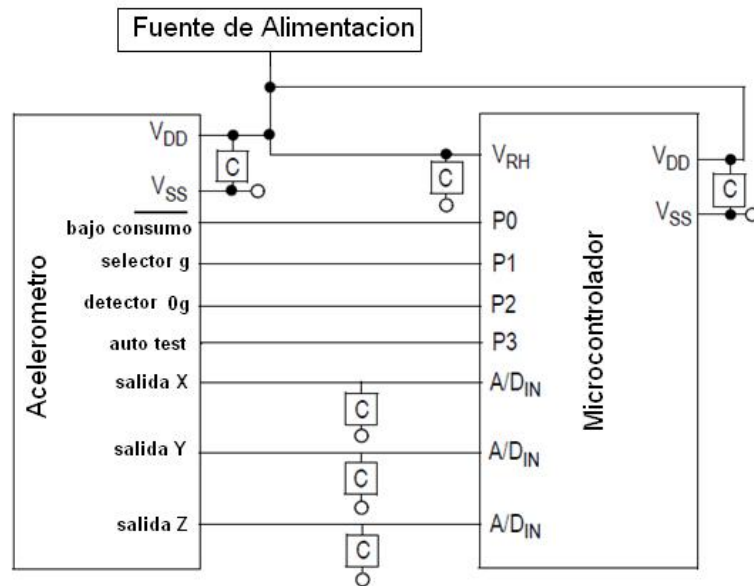


Figura 25: Aceleración dinámica

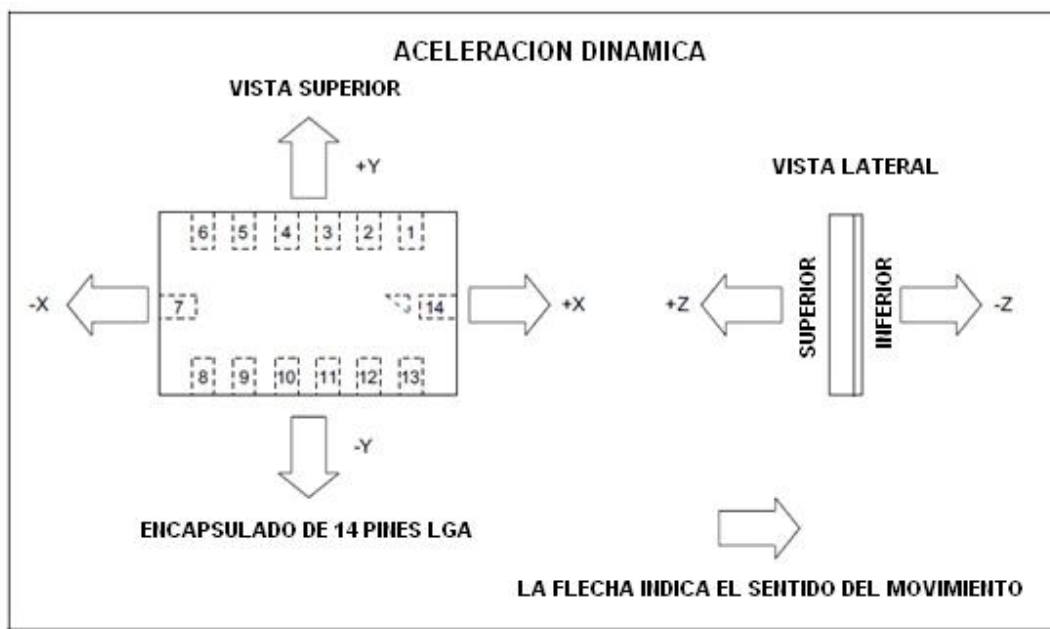
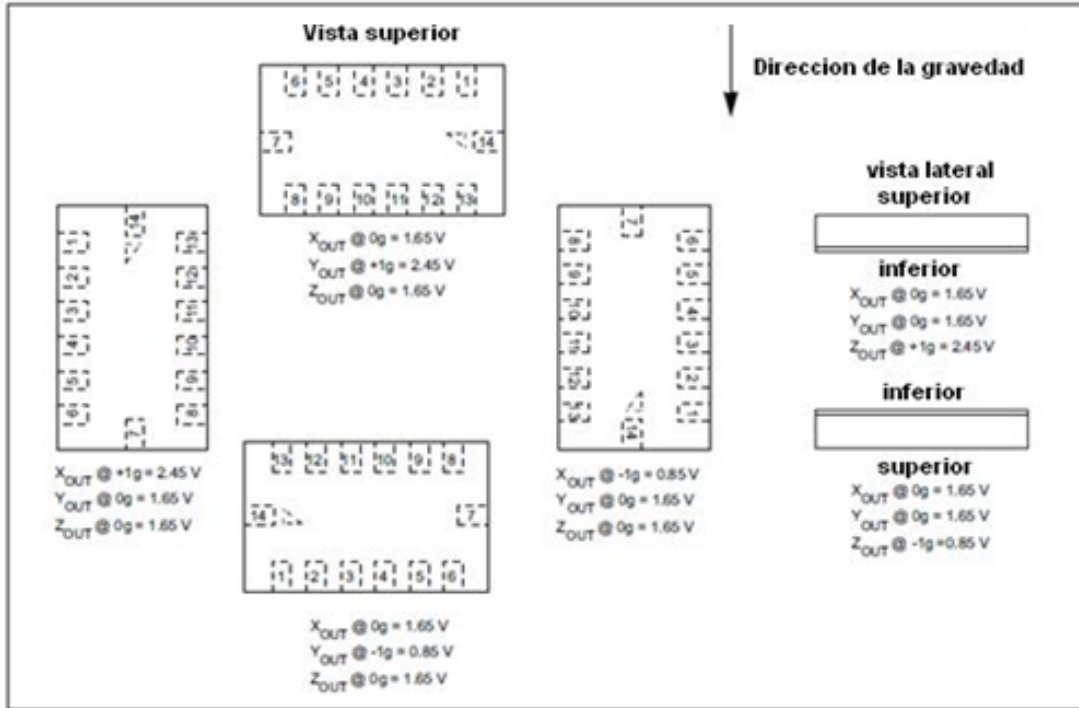


Figura 26: Aceleración estática



[4]

3.3. COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Comunicaciones por Radiofrecuencia

Una comunicación inalámbrica es cuando los medios de unión entre sistemas no son con cables. Sus principales ventajas son que permiten una facilidad de emplazamiento y reubicación, evitando la necesidad de establecer un cableado y su rapidez en la instalación.

Las técnicas utilizadas son: por Infrarrojos (IR), y por radiofrecuencia (RF).

Infrarrojos: Sólo permiten comunicaciones para pequeñas distancias, los puntos de conexión deben ser siempre visibles, el campo de aplicación es limitado, su uso aún no es muy extendido.

3.3.1. Tipos de comunicaciones inalámbricas por RF

Las transmisiones de datos entre equipos electrónicos sin cables se están aplicando cada vez más debido a los medios tecnológicos actuales. Existe una gran variedad de circuitos integrados compatibles y de bajo costo que permiten la instrumentación en RF; estos dispositivos requieren pocos componentes externos.

La estandarización ha permitido poderlos utilizar en los diferentes campos ya sea aplicación industrial, comercial, y medico, como: control remoto, transmisión de datos en sensores o sistemas de adquisición de datos, en monitorización médica o de la salud, etc.

Las comunicaciones inalámbricas por RF se pueden dividir en las que no cumplen ningún protocolo estándar (llamadas propietarias) y las que cumplen un protocolo estándar.^[5]

3.3.2. Protocolos de comunicación

Llamamos protocolo de comunicaciones a una serie de normas que usan los equipos informáticos para gestionar sus diálogos en los intercambios de información. Dos equipos diferentes de marcas diferentes se pueden comunicar sin problemas en el caso en que usen el mismo protocolo de comunicaciones.^[6]

3.3.2.1. Protocolo de comunicación IEEE 802.11

El protocolo **IEEE 802.11** o **WI-FI** es un estándar de protocolo de comunicaciones del IEEE que define el uso de los dos niveles más bajos de la arquitectura OSI (Open System Interconnection: en español, modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos), especificando sus normas de funcionamiento en una WLAN. En general, los protocolos de la rama 802.x definen la tecnología de redes de área local.^[7]

Tabla 4: Características más importantes de las versiones del protocolo IEEE 802.11

VERSION	VELOCIDAD (Megabites/segundo)	ALCANCE (Metros)	FRECUENCIA (GigaHertz)
802.11	2	10	2.4
802.11.a	54	40	5.15
802.11.b	11	40	2.4
802.11.g	54	100	2.5
802.11.n	>100	300	2.4 - 40

NOTA: Es muy importante tener en cuenta que para obtener la máxima velocidad y alcance tanto el emisor como el receptor (router y pc) deben poseer la misma versión.

Consideraciones sobre las comunicaciones RF de corto alcance

Siempre que se empieza hablar de comunicaciones RF, se indaga sobre el costo, el alcance, el consumo, usar un estándar o no. Estas preguntas siempre están relacionadas, ya que hay una serie de parámetros que influyen en ellas. Por ejemplo, el alcance depende de la frecuencia de trabajo, a mayor frecuencia menor alcance. El alcance depende de la potencia de salida, pero también de la sensibilidad de recepción. La potencia

de salida y la sensibilidad del receptor dependen también de la antena, del tipo de antena (externa, cerámica o de circuito impreso) y de sus características. Y finalmente depende del entorno o medio, es decir, no es lo mismo en el aire libre en campo abierto o en una ciudad, dentro de un ambiente industrial o en un edificio, con paredes sencillas o con muros de cemento.

Resumiendo, el rango de trabajo en RF depende de los siguientes factores:

- Frecuencia
- Potencia de salida
- Sensibilidad de recepción
- Características de la antena
- Entorno de trabajo

3.3.2.2. Protocolo IEEE 802.15.4

IEEE 802.15

El Estándar IEEE 802.15 se enfoca básicamente en el desarrollo de estándares para redes tipo PAN o HAN redes inalámbricas de corta distancia. Al igual que Bluetooth o Zigbee el 802.15 permite que dispositivos inalámbricos portátiles como PCs, PDAs, teléfonos, pagers, sensores y actuadores utilizados para domótica, entre otros, puedan comunicarse e interoperar uno con el otro. Debido a que Bluetooth no puede coexistir con una red inalámbrica 802.11x, de alguna manera la IEEE definió este estándar para permitir la interoperabilidad de las redes inalámbricas LAN con las redes tipo PAN o HAN.

IEEE 802.15.4

Entre muchas particularidades podemos destacar las características más importantes del estándar IEEE 802.15.4 son la flexibilidad de la red, bajo costo y bajo consumo de energía; este estándar se puede utilizar para muchas aplicaciones domóticas e industriales, donde se requieren una baja tasa de transmisión de datos.

- Diversas bandas de trabajo: 2.4 GHz (16 Canales), 915 Mhz (10 Canales), 868 MHz (1 Canal)
- Tasas de transferencia: 250 Kb/s, 40 Kb/s, 20 Kb/s
- Topologías: estrella y p2p (punto-a-punto)
- Direccionamiento MAC recortado (16 bits) y extendido (64 bits)
- Métodos de acceso al canal: CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
- Bajo consumo energético
- Gran densidad de nodos por red
- Radio medio de alcance: 50 m (hasta 500 m, dependiendo del entorno) ^[8].

Tabla 5: Propiedades del protocolo IEEE 802.15.4

Bandas de frecuencia y rango de transmisión de datos	868MHz: 20Kb/s ; 915MHz: 40Kb/s ; 2.4GHz: 250Kb/s.
Alcance	10-20 m.
latencia	Por debajo de 15 ms.
Canales	868/915MHz: 11 canales. 2.4GHz: 16 canales.
Modos de Direccionamiento	Todos los circuitos integrados tienen 64 bits IEEE de direccionamiento
Canal de acceso	CSMA-CA

Seguridad	128 AES
Red	Hasta 2 ⁶⁴ dispositivos
Rango de temperatura	-40 a +85 °C

3.3.2.3. Estándar ZigBee

El término *ZigBee* describe un protocolo inalámbrico normalizado para la conexión de una Red de Área Personal Inalámbrico o WPAN.

ZigBee es diferente de los otros estándares inalámbricos, ha sido diseñado para soportar un diverso mercado de aplicaciones con una conectividad más sofisticada que los anteriores sistemas inalámbricos. El estándar enfoca un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja tasa de transmisión de datos, bajo ciclo de servicio de conectividad y bajo costo.

La razón de promover un nuevo estándar, es para permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes.

Dentro del protocolo ZigBee, el manejo de las capas PHY y MAC es dejado al control del estándar IEEE 802 y la alianza ZigBee desarrolló las capas NWK y APS del protocolo.

ZigBee es un estándar donde el estándar IEEE 802.15.4 solo contempla las capas PHY (*Physical Layer*)¹ y MAC (*Medium Access Control*); las capa NWK (*Network Layer*) y APS (*Application Layer*) han sido establecidas por la Alianza *ZigBee*.

3.3.2.3.1. Características generales y de funcionamiento de ZigBee

- Doble capa física (2.4 GHz y 868/915 MHz)

¹ Del inglés *Physical Layer* que significa “capa física”

- Velocidad de datos 250 kbps (2.4 GHz), 40 kbps (915 MHz), y 20 kbps (868 MHz)
- Optimización de la energía debido a su bajo ciclo de trabajo (1%).
- El método de acceso al canal es CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance o en español Acceso Múltiple Sensible a la Portadora- con anulación de Colisiones) el método CSMA está diseñado para redes que comparten el medio de transmisión.
- Baja tasa en la transmisión de datos para dispositivos como sensores debido a su bajo ciclo de trabajo.
- Poco uso de la batería (la batería puede durar de varios meses e incluso años).
- Múltiples topologías: *star, cluster tree, mesh*
- GTS (*Guaranteed Time Slots*) opcional para aplicaciones que requieren baja latencia.
- Los dispositivos de *ZigBee* son más ecológicos que sus predecesores, ahorrando energía a despliegue total.
- Bajo costo en los dispositivos, instalación y mantenimiento.
- Permite la creación de redes que requieren poco mantenimiento.
- Redes de alta densidad de nodos. *ZigBee* permite que las redes manejen hasta 216 dispositivos. Este atributo es fundamental para la creación de series masivas de sensores y redes de mando.
- Presenta un *stack* de protocolos simple. Se estima que el *stack* de *ZigBee* es aproximadamente 1/4 del *stack* de protocolos de *Bluetooth* u 802.11. Siendo esta simplicidad esencial para el costo, interoperabilidad y mantenimiento.
- Implementación global. La capa física del IEEE 802.15.4 adoptada por *ZigBee* se ha diseñado para la banda de 868 MHz en Europa, la banda de 915 MHz en Norte América, Australia, etc.; y la banda de 2.4 GHz que

es reconocida como una banda global aceptada en casi todos los países.^[9]

3.4. Módulos de radiocomunicación Xbee

Los módulos Xbee (de Digi International) son módulos de radio frecuencia que trabajan en la banda de 2.4 GHz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por Maxstream.

Son utilizados en automatización de casas, sistemas de seguridad, monitoreo de sistemas remotos, aparatos domésticos, alarmas, plantas tratadoras de agua, etc.

Figura 27: Tipos de Xbee

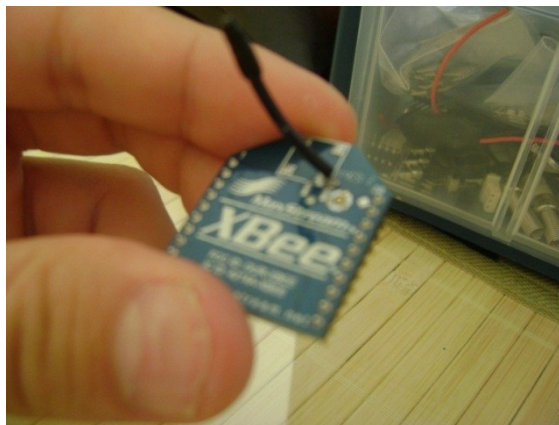


3.4.1. Características

- Los XBEE Marca Digi (Maxstream) serie 2 que cumple con el estándar IEEE 802.15.4 con baja potencia y bajo costo. Tiene un alcance aproximado de 40 metros en interiores y de 120 metros en exteriores con línea de vista.

- La potencia de transmisión es de 1.25mW (+1dBm) y la sensibilidad del receptor es de -96dBm.
- Tiene un ADC incluido. Funcionan a 2.4 GHz con una tasa de transferencia máxima de 250Kbps. El módulo trae la antena tipo “asta” incorporada.
- Dimensiones: ancho: 24.38 mm; largo: 27.61 mm; alto de antena: 25 mm.

Figura 28: Vista del transceptor de radiofrecuencia Xbee.



- Los Xbee pueden ser programados mediante una hiperterminal y una interfaz gráfica serial con un max3232 ó una serie de comandos llamados AT², pero este segundo método es más complicado puesto que requiere de extensas líneas de código.
- La configuración de los módulos XBEE se realiza a través de una interfaz serial con un computador y con el empleo de comandos AT, pero llevar a cabo esta tarea, se facilita gracias a una interfaz software desarrollado por la misma empresa fabricante del dispositivo llamado X-CTU.

² Los comandos AT son instrucciones codificadas que conforman un lenguaje de comunicación entre el hombre y un Terminal MODEM

Figura 29: interfaz USB.



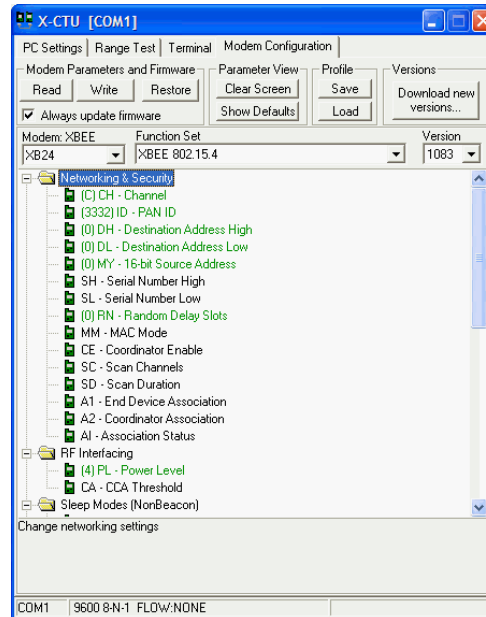
- Existen dos tipos de interfaces, serial y USB que pueden ser utilizadas para programar los Xbee con un software propietario llamado x-ctu.

Figura 30: Interfaz acoplada con el transceptor.



- Con este software podemos definir de una forma rápida todos los parámetros que queremos modificar en nuestros Xbee.

Figura 31: Vista de la ventana del X-CTU



- Una de las ventajas es que podemos tener hasta 65000 combinaciones distintas de red y se pueden hacer redes de punto a punto y punto a multi-punto.
- Los Xbee tienen 6 conversores análogo-digital y 8 entradas digitales además de RX y TX.^[10]

3.5. USB

Las siglas USB corresponden a *Universal Serial Bus*, Bus Universal en Serie o Conductor Universal en Serie (CUS), se trata de un sistema de comunicación entre dispositivos electrónicos-informáticos que sólo transmite una unidad de información a la vez.

El bus universal en serie, consiste en una norma para bus periférico, desarrollado tanto por industrias de computación como de telecomunicaciones.

El bus USB se compacta en un cable de cuatro hilos, dos para datos, dos para alimentación. Esto supone un gran ahorro, tanto de espacio como de material. De acuerdo a estos parámetros, una de las principales ventajas que se obtiene de USB es precisamente su diseño.

El USB organiza el bus en una estructura de árbol descendente, con múltiples dispositivos conectados a un mismo bus, en la que unos elementos especiales, llamados *hubs*, enrutan las señales en su camino desde un dispositivo al host o viceversa. Primero está el controlador del bus, éste es el interfaz entre el bus USB y el bus del ordenador. De él cuelgan los dispositivos USB. Los hubs, como son un dispositivo USB más, también cuentan. A un hub se puede conectar uno o más dispositivos, que a su vez pueden ser otros hubs, así tenemos varios dispositivos conectados a un sólo controlador; como máximo alrededor de 126.

3.5.1. Características

- permite adjuntar dispositivos periféricos al ordenador rápidamente, sin necesidad de reiniciarlo ni de volver a configurar el sistema.
- Los dispositivos con USB se configuran automáticamente tan pronto como se han conectado físicamente.
- Se pueden unir dispositivos USB en una cadena para conectar más de dos dispositivos al ordenador mediante otros periféricos USB.
- Fácil uso para los usuarios:
 - Modelo simple para el cableado y los conectores

- Detalles eléctricos aislados del usuario (terminaciones del bus)
- Periféricos auto-identificativos
- Periféricos acoplados y reconfigurados dinámicamente (Hot Swappable)
- Flexibilidad
 - Amplio rango de tamaños de paquetes, permitiendo variedad de opciones de buffering de dispositivos
 - Gran variedad de tasas de datos de dispositivos acomodando el tamaño de buffer para los paquetes y las latencias
 - Control de flujo para el manejo del buffer construido en el protocolo
- Ancho de banda isócrono
 - Se garantiza un ancho de banda y bajas latencias apropiadas para telefonía, audio.
 - Cantidad de trabajo isócrono que puede usar el ancho de banda completo del bus.
 - Control de flujo para el manejo del buffer construido en el protocolo
- Amplia gama de aplicaciones y cargas de trabajo
 - Adecuando el ancho de banda desde unos pocos Kbs hasta varios Mbs.
 - Soporta tanto el tipo de transferencia isócrono como el asíncrono sobre el mismo conjunto de cables.
 - Conexiones múltiples, soportando operaciones concurrentes de varios dispositivos.
 - Soporta hasta 127 dispositivos físicos.
 - Soporta la transferencia de múltiples datos y flujos de mensajes entre el host y los dispositivos

- Robustez
 - Manejo de errores y mecanismos de recuperación ante fallos implementados en el protocolo.
 - Inserción dinámica de dispositivos
 - Soporte para la identificación de dispositivos defectuosos.
- Implementación de bajo coste
 - Sub canal de bajo coste a 1.5 Mbs
 - Conectores y cables de bajo coste
 - Adecuado para el desarrollo de periféricos de bajo coste

3.5.2. Tipos de USB

Las versiones con que se ha contado hasta el momento son: USB 1.0, USB 1.1, USB 2.0 usada actualmente y está empezando a extenderse la versión más moderna la USB 3.0.

3.5.2.1. USB 2.0

Como principal característica nos encontramos con un aumento de velocidad hasta 480 Mbps (casi 40 veces la velocidad anterior) con una diferencia de costo mínimo. De este aumento de velocidad le viene el nombre de Hi-Speed.

En total USB 2.0 soporta tres tipos distintos de velocidad: Hi-Speed 480 Mbps, Full-Speed 12 Mbps, Low-Speed 1.5 Mbps

Compatibilidad retrospectiva: compatibilidad con los controladores y dispositivos 1.0 y 1.1, de manera que pueden utilizar los mismos conectores e interfaces de software.

El alcance de uso para la versión USB 2.0 se ve incrementada notablemente respecto a sus predecesoras.

3.5.2.2. USB 3.0

El USB 3.0 promete una transferencia de archivos 10 veces más rápida que la actual, el USB 2.0. Éste alcanzará velocidades de 4.8Gbit por segundo (600MB/s), superando por diez veces a la actual, que es de 480MBit por segundo. Será compatible tanto con la primera versión de USB como con la segunda. Además, estará optimizado para un buen ahorro de energía y preparado para aceptar aun mayores velocidades.

3.5.3. Velocidades de transmisión

Los dispositivos USB se clasifican en cuatro tipos según su velocidad de transferencia de datos:

- Baja velocidad (1.0): Tasa de transferencia de hasta 1,5 Mbps (192 KB/s). Utilizado por teclados, ratones, cámaras web, etc.
- Velocidad completa (1.1): Tasa de transferencia de hasta 12 Mbps (1,5 MB/s) según este estándar, muchos dispositivos fabricados en la actualidad trabajan a esta velocidad.
- Alta velocidad (2.0): Tasa de transferencia de hasta 480 Mbps (60 MB/s) pero por lo general de hasta 125Mbps (16MB/s). Está presente casi en el 99% de los PC actuales.
- Súper alta velocidad (3.0): Tiene una tasa de transferencia de hasta 4.8 Gbps (600 MB/s). Esta especificación es diez veces más veloz que la anterior 2.0

Las señales del USB se transmiten en un cable de par trenzado con impedancia característica de $90 \Omega \pm 15\%$, cuyos hilos se denominan D+ y D-. Estos, colectivamente, utilizan señalización diferencial en full dúplex para combatir los efectos del ruido electromagnético en enlaces largos. D+ y D- suelen operar en conjunto y no son conexiones simples. Los niveles de transmisión de la señal varían de 0 a 0.3 V para bajos (ceros) y de 2.8 a 3.6 V para altos (unos) en las versiones 1.0 y 1.1, y en ± 400 mV en alta velocidad (2.0). En las primeras versiones, los alambres de los cables no están conectados a masa, pero en el modo de alta velocidad se tiene una terminación de 45Ω a tierra o un diferencial de 90Ω para acoplar la impedancia del cable. Este puerto sólo admite la conexión de dispositivos de bajo consumo, es decir, que tengan un consumo máximo de 100 mA por cada puerto; sin embargo, en caso de que estuviese conectado un dispositivo que permite 4 puertos por cada salida USB (extensiones de máximo 4 puertos), entonces la energía del USB se asignará en unidades de 100 mA hasta un máximo de 500 mA por puerto. ^[11]

3.5.5. Cables y conectores

Existen dos clases de conectores USB:

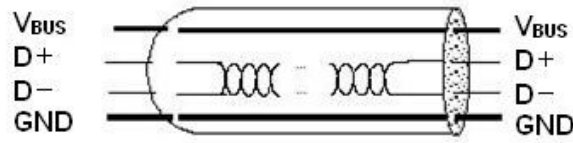
- Conectores "**Tipo A**", que tienen forma rectangular y se utilizan generalmente para dispositivos que consumen poco ancho de banda (como teclados, ratones, y cámaras Web).
- Conectores "**Tipo B**", que tienen forma cuadrada y se utilizan generalmente para dispositivos con altos requisitos de ancho de banda (como discos rígidos externos).

Tabla 6: Tipos de conectores USB

 USB estándar	TIPO A		TIPO B	
	Macho	Hembra	Macho	Hembra
				
Mini USB 5 pines				
Mini USB 8 pines				
Micro USB				
USB 3.0 estándar				
Micro USB 3.0				

USB transfiere señales y energía a los periféricos utilizando un cable de 4 hilos, apantallado para transmisiones a 12 Mbps y no apantallado para transmisiones a 1.5 Mbps. En la figura 6 se muestra un esquema del cable, con dos conductores para alimentación y los otros dos para señal, debiendo estos últimos ser trenzados o no según la velocidad de transmisión.

Figura 32: Diagrama físico del cable USB

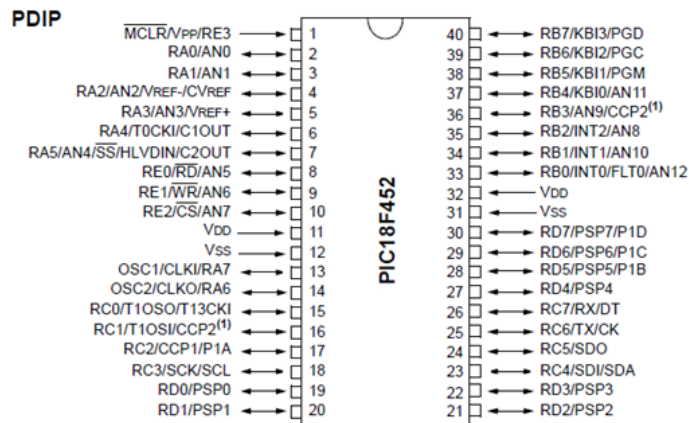


El calibre de los conductores destinados a alimentación de los periféricos varía desde 20 a 26 AWG, mientras que el de los conductores de señal es de 28 AWG. La longitud máxima de los cables es de 5 metros. ^[12]

3.6. PIC18LF452

Este circuito integrado fabricado por *Microchip Technology Inc.* es un dispositivo programable de gama alta, compatible con código de ensamblador, pero optimizado para ser programado en lenguaje C. Su versatilidad, producto de sus periféricos e interfaces de comunicación serial y paralela, en conjunto con sus características de velocidad y memoria, lo convierten en una excelente opción para diseñar instrumentos de control de mediana y alta complejidad, razones por las cuales fue escogido para éste proyecto.

Figura 33: Distribución de pines del PIC18F452



3.6.1. Características

Cuenta con cinco puertos digitales paralelos de entrada y salida, tres de ellos de 8 bits, uno de 5 bits y el último de 3 bits. Entre sus principales módulos adicionales, se destacan: El conversor análogo digital de 13 canales, las unidades de control de velocidad por ancho de pulso PWM, temporizadores, el manejo de interrupciones, entre otros.

Principales Características Técnicas:

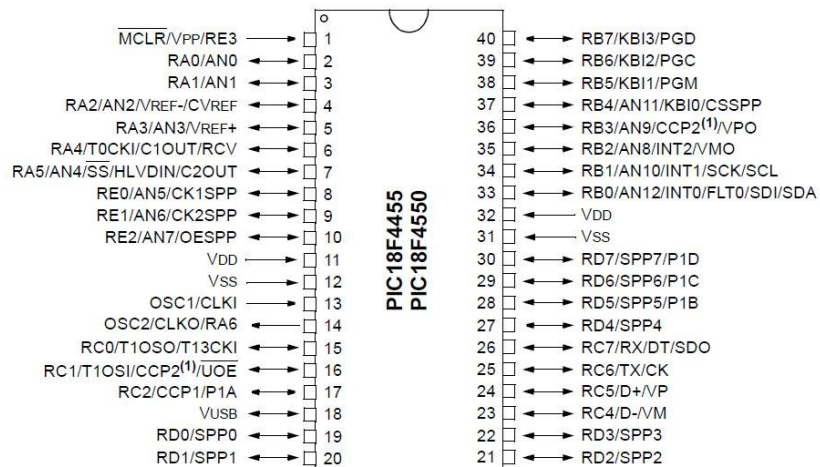
- Alimentación flexible con tecnología NanoWatt, desde 2,0V hasta 5,5V
- Posibilidad de oscilador interno
- Memoria de programa tipo Flash Embebida de 32 Kb
- Memoria RAM de 1536 Bytes
- Memoria EEPROM de 256 bytes
- Hasta 10 millones de instrucciones por segundo (MIP's)
- Hasta 40 MHz de frecuencia de operación
- Corriente de Fuente y Sumidero para los pines digitales de hasta 25 mA.
- Tres pines externos de interrupciones
- Cuatro módulos temporizadores/contadores
- Dos unidades de captura/comparación/PWM
- Módulo de puerto serial maestro sincrónico (MSSP), con dos modos de operación:
 - 3-wire SPI™ (Soporta los cuatro módulos SPI)
 - I2C™ En modo maestro y esclavo

- Módulo direccionable USART con soporte para los protocolos RS-485 y RS-232
- Conversor Análogo Digital de 10 bits, de 13 canales.
- Voltaje de operación de 2.2 a 5 voltios
- Encapsulado DIP de 40 pines ^[13]

3.7. PIC18F4550

Este segundo Microcontrolador PIC, el 18F4550, es un dispositivo de 8 bits fabricado por *Microchip Technology* igual que el PIC 18F452, es de gama alta, versátil, e Ideal para aplicaciones integradas de control y vigilancia que requieren de conexión periódica con un PC a través de el puerto USB para los datos de carga / descarga y / o actualizaciones del firmware.

Figura 34: Distribución de pines del PIC18F4550



3.7.1. Características

Además de poseer las mismas características del PIC18F452, descrita en apartado anterior, presenta las siguientes:

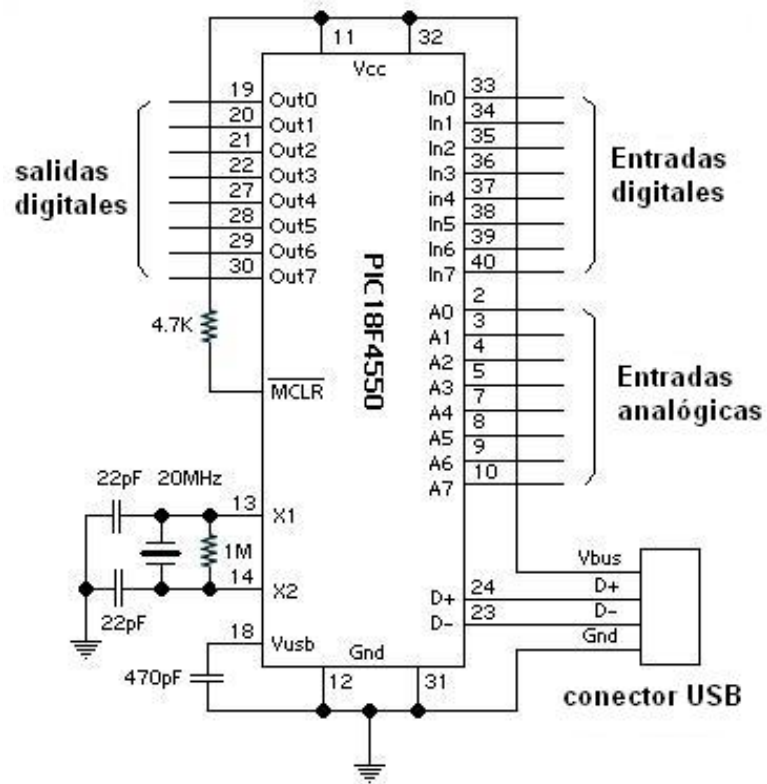
- Memoria ROM: 16K
- Memoria RAM: 2Kb
- Frecuencia: 48 MHz con cristal externo
- Permite programación ICSP
- Permite comunicación directa USB 2.0 por hardware.

3.7.2. Módulo USB del PIC 18F4550

El microcontrolador PIC18F4550 incorpora un módulo USB, el cual permite desarrollar periféricos sencillos tanto de baja velocidad (1.5 Mb/s) como de alta velocidad (12Mb/s), y que solo requieran transferencias de control y de interrupción. Permiten el uso de hasta 32 puntos finales (16 bidireccionales). Dicho módulo consta de una serie de registros que configuran y regulan su funcionamiento, así como de un SIE (Serial Interface Engine- motor de la interfaz en serie) encargado de la generación del CRC (comprobación de la redundancia cíclica) y la sincronización de las señales D+ y D-.

Cada vez que se produce una transmisión o recepción de datos en el bus, se genera una interrupción en el PIC ante la cual la rutina de atención debe responder gestionando todos los aspectos de bajo nivel de la especificación USB. De esta manera para la aplicación principal que ejecuta el microcontrolador el manejo del protocolo USB es transparente.^[14]

Figura 35: Diagrama de conexiones básico para la interfaz USB



4. DISEÑO DEL HARDWARE

4.1. TARJETA DEL ACELERÓMETRO

Esta tarjeta, es la encargada de medir las vibraciones y aceleraciones de la planta estudiada. Está constituida por tres módulos: el acelerómetro, el transceptor de radio frecuencia y el microcontrolador:

Figura 36: Tarjeta del acelerómetro.

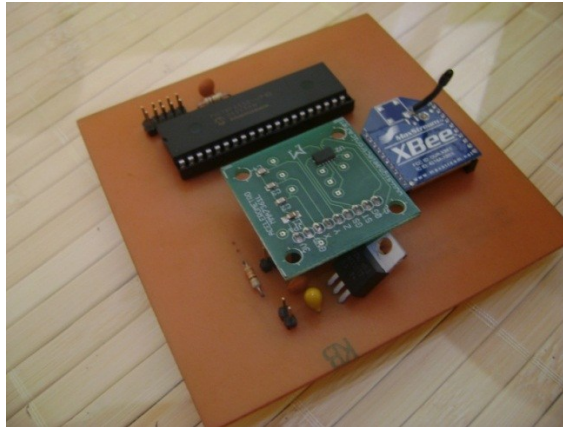
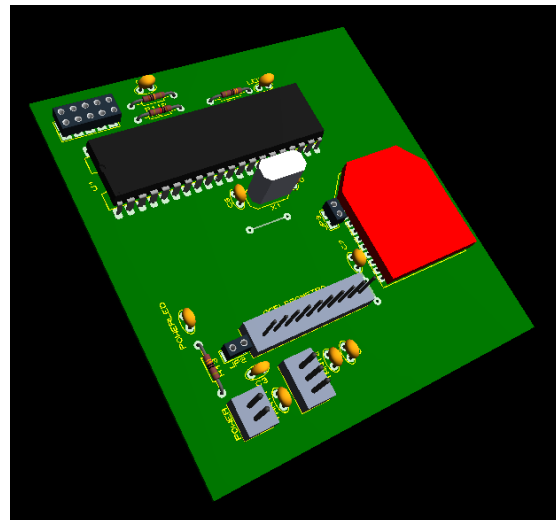
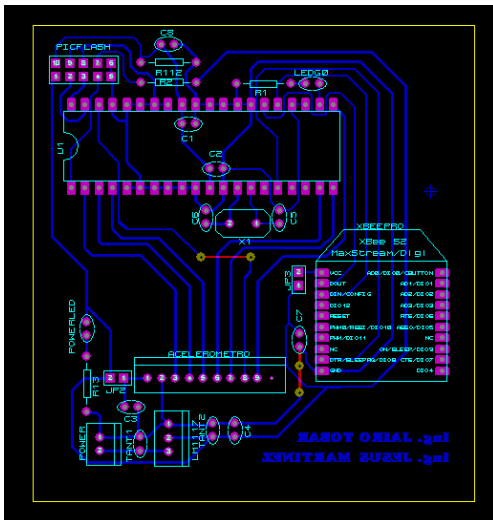
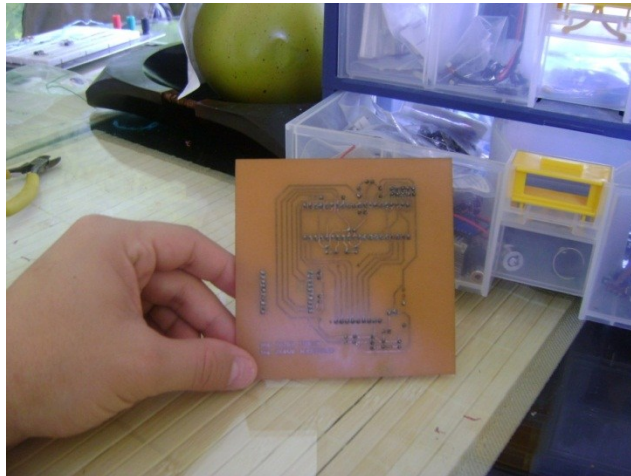


Figura 37: Diseño del circuito impreso y su vista previa en 3D



El acelerómetro, entrega la información correspondiente a cada eje, como una variación analógica de voltaje. Los tres ejes son leídos a través del conversor análogo digital (ADC) del microcontrolador con una resolución de 10 bits. Los datos son enviados de forma serial al transceptor XBEE y éste se encarga de enviarlos por la red inalámbrica al módulo de adquisición de datos USB.

Figura 38: Vista inferior de la tarjeta del acelerómetro.

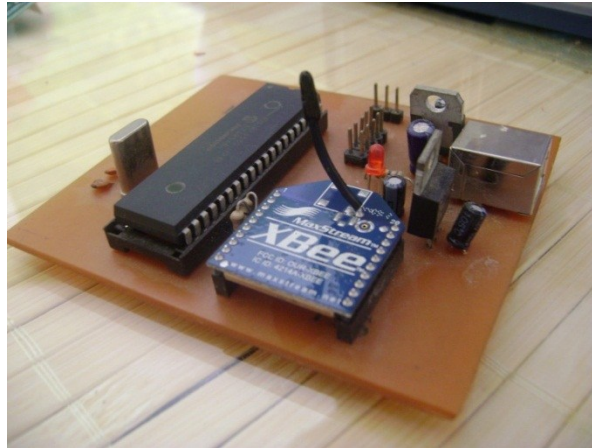


Esta tarjeta puede ser alimentada con una batería de 9V, o cualquier adaptador de DC entre 7.5V y 18,5V que garantice al menos 200mAH.

4.2. TARJETA DE RECEPCIÓN E INTERFAZ USB

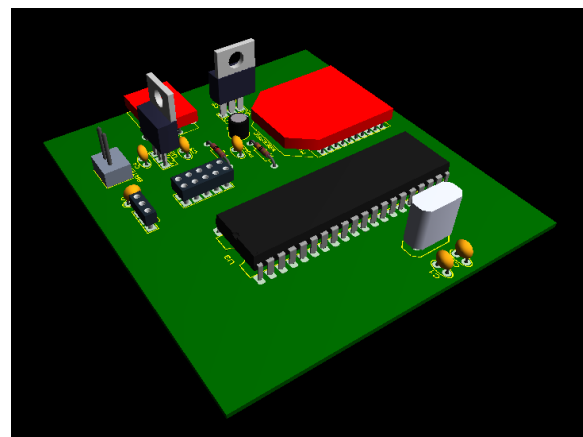
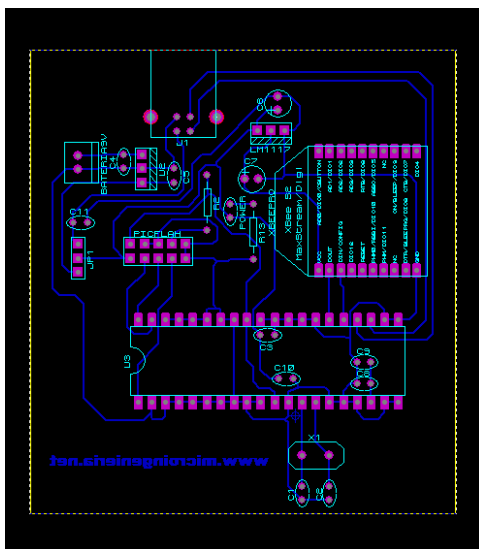
Esta tarjeta se encarga de recibir por red inalámbrica los datos enviados desde el acelerómetro y pasarlos al computador por un puerto USB. Está constituida por tres módulos: El Transceptor XBEE, el microcontrolador PIC y el conector USB, como se muestra a continuación:

Figura 39: tarjeta de recepción e interfaz USB.



Gracias al soporte del PIC18F4550 para conexión USB, solo es necesario el empleo de algunos capacitores y el conector hembra USB. Un regulador de 3.3V, permite que el sistema obtenga su alimentación eléctrica directamente desde el puerto del computador.

Figura 40: Diseño del circuito impreso y su vista previa en 3D.



5. DISEÑO DEL SOFTWARE

5.1. FIRMWARE³ (SOFTWARE EMBEBIDO)

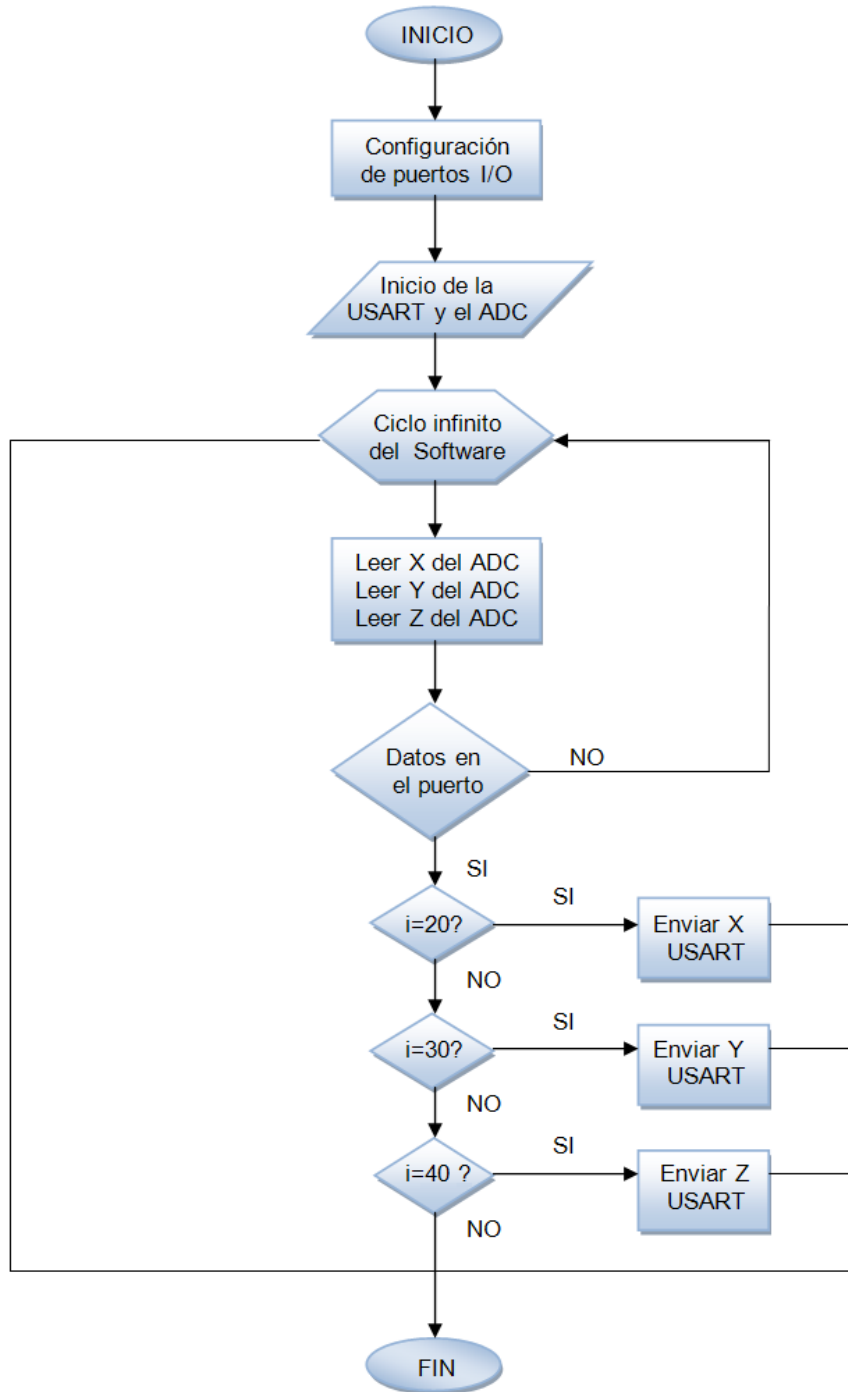
Para el desarrollo del sistema, fue necesario abordar el diseño e implementación de software para ser programado dentro de los microcontroladores que gobiernan las tarjetas del acelerómetro y de recepción e interfaz USB:

5.1.1. Firmware de la tarjeta del acelerómetro

Dentro del microcontrolador de la tarjeta del acelerómetro, se desarrolló un firmware contenido en un ciclo infinito, cuyo diagrama general de flujo se presenta a continuación:

³ Software embebido en un dispositivo electrónico

Figura 41: Diagrama de flujo del firmware de la tarjeta del acelerómetro.



Como se puede observar, la rutina ejecutada de forma continua por el procesador del microcontrolador, consiste en la lectura de sus tres canales de conversión análogo – digital (asignados a cada uno de los ejes medidos por el acelerómetro X, Y y Z), tras lo cual, se consulta el estado de peticiones en el puerto serial, para determinar si se ha solicitado un dato en particular y de ser así enviarlo a través del transceptor de RF conectado al puerto serial.

El control del flujo de información, se realiza a través de un protocolo establecido por los desarrolladores, en el cual, los códigos hexadecimales correspondientes a 20, 30 y 40, son empleados para identificar cada uno de los ejes medidos por el acelerómetro.

Es importante aclarar, que el transceptor se encuentra recibiendo información constantemente, pero solo transmite en el caso de que la información recibida concuerde con alguno de los datos hexadecimales mencionados.

Esta característica implementada en el protocolo, se ha implementado con el fin de poder adaptar al sistema a un sistema de alarmas de niveles de vibración por amplitud y frecuencia, de tal modo que el transceptor ubicado en la tarjeta del acelerómetro, se pueda mantener en el estado de SLEEP (bajo consumo de energía) y solo se active para transmitir cuando haya un evento sobresaliente.

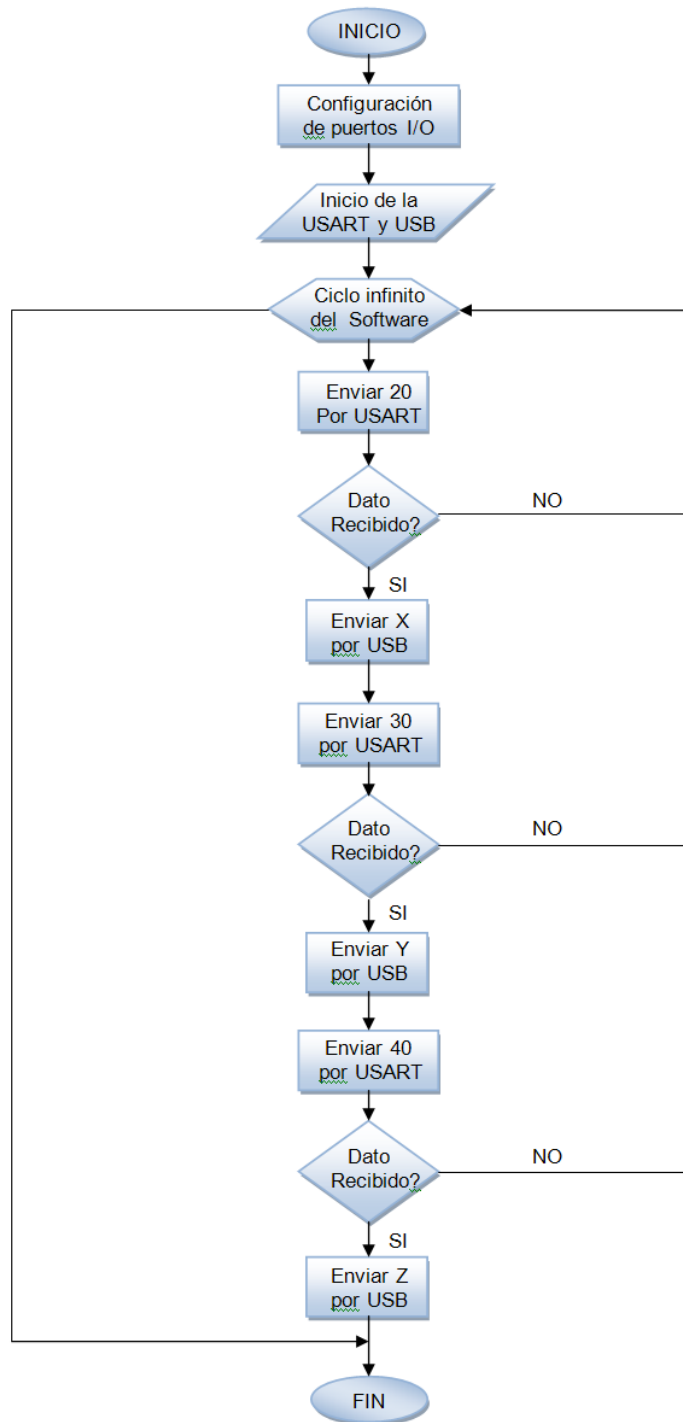
Sin embargo, en el modo normal de operación, el microcontrolador no pone al transceptor en estado de bajo consumo, ya que los objetivos de este proyecto son los de monitoreo permanente y en tiempo real.

5.1.2. Firmware de la tarjeta de recepción e interfaz USB

Como se puede apreciar en el siguiente diagrama de flujo simplificado, el microcontrolador de la tarjeta de recepción e interfaz USB, se encarga de adaptar y conectar los dos protocolos que maneja: el RS232, en el cual se solicitan y reciben los datos desde el transceptor RF y el protocolo USB con el que se entrega la información al ordenador.

Dentro de un ciclo infinito, el firmware de ésta tarjeta fue diseñado para enviar de forma constante y cíclica peticiones específicas de los valores leídos por el acelerómetro en la otra tarjeta. El algoritmo consiste en el envío de los equivalentes hexadecimales para los números 20, 30 y 40, y su recepción tras el comando aceptado. Si el dato es entregado por la otra tarjeta, se garantiza la veracidad del mismo y se envía a través del puerto USB.

Figura 42: Diagrama de flujo del firmware de la tarjeta de recepción e interfaz USB.



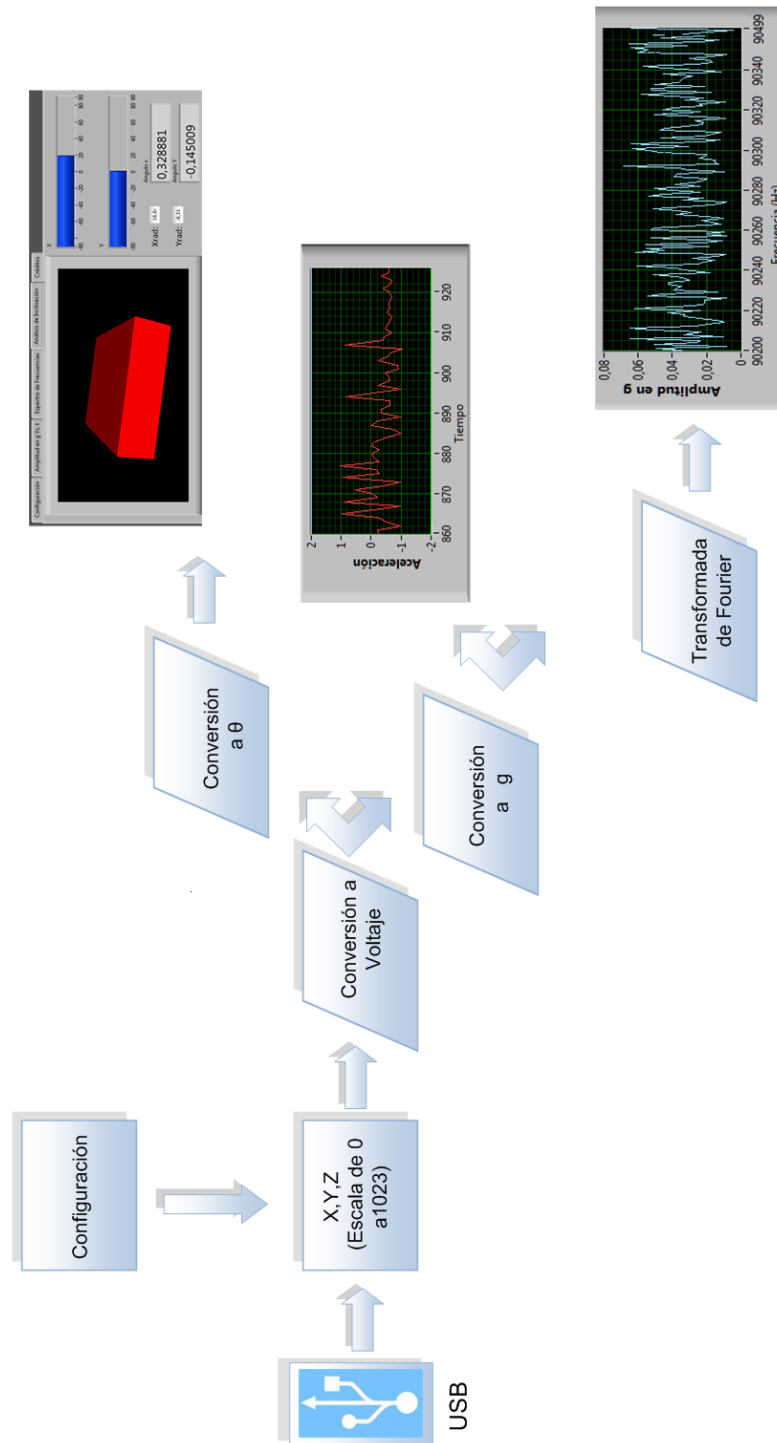
5.2. INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO (GUI EN LABVIEW)

La potencialidad del análisis de oscilaciones y vibraciones, se fundamenta en la posibilidad de apreciar los sucesos de forma cualitativa y cuantitativa en gráficos que se actualicen en tiempo real frente a los datos ingresados al computador.

Se concibió entonces una interfaz gráfica de usuario (GUI) por su sigla en inglés, a partir del diseño e implementación de un instrumento virtual, elaborado en la plataforma *LabView* de *National Instruments*, de la cual la Universidad del Cauca cuenta con varias licencias.

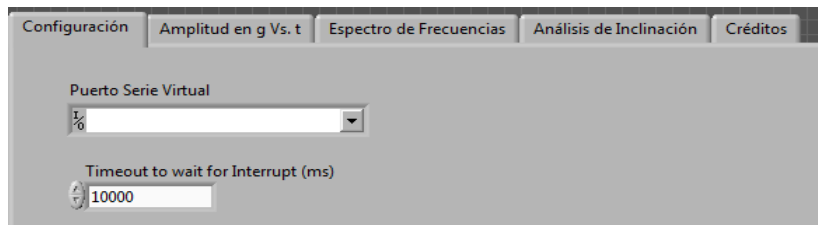
El siguiente diagrama de bloques, describe de forma generalizada, la estructura del algoritmo que permite el procesamiento y análisis de las señales provenientes de la tarjeta del acelerómetro:

Figura 43: Diagrama de bloques del funcionamiento del funcionamiento del software de la interfaz grafica.



Debido a que resulta igualmente valioso e interesante conocer las variaciones en cada eje, tanto con respecto al tiempo como a la frecuencia, se dividió el entorno gráfico en ventanas individuales accesibles por pestañas:

Figura 44: Vista general de la interfaz de usuario.



Para el análisis de la amplitud, el sistema presenta gráficas que muestran la variación medida en gravedades, frente al tiempo en centésimas de segundo:

Figura 45: Vista de la ventana de aceleración vs tiempo en reposo.

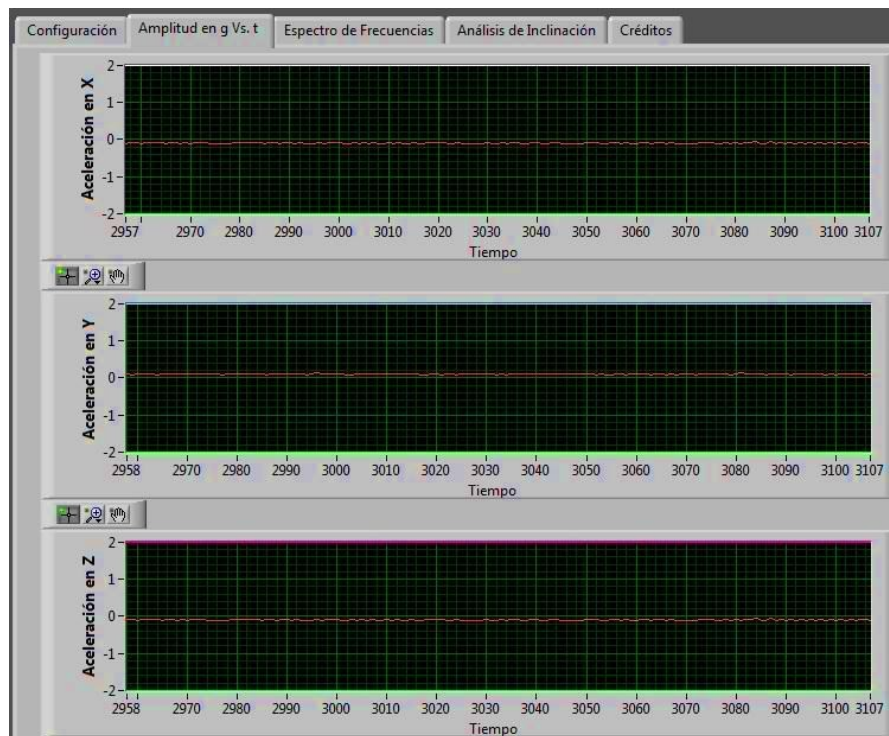
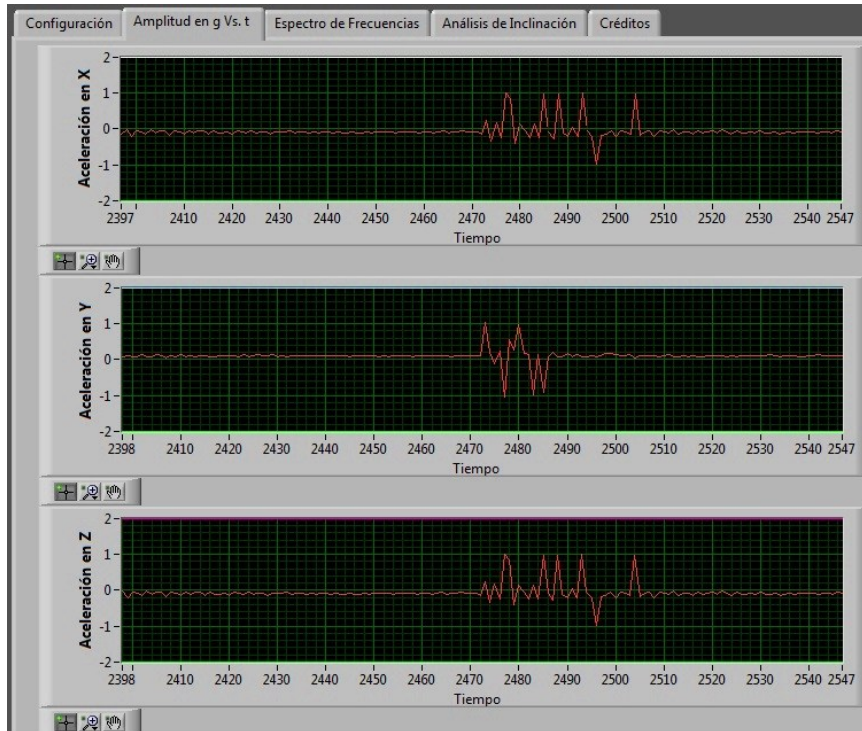


Figura 46: Vista de la ventana de aceleración vs tiempo con perturbación.



Se implementaron controles potenciométricos para poder establecer límites superiores e inferiores cuya función es la de encender un piloto tipo LED en el panel frontal para mostrar cuando las vibraciones superan estos valores.

De forma adicional, se adecuaron indicadores tipo tacómetro para facilitar la lectura de patrones o tendencias en forma cualitativa.

Finalmente, pulsadores en cada gráfica permiten guardarlas como imágenes en formato BMP para brindar la posibilidad de registros.

El análisis en el dominio de la frecuencia se hace a partir de la transformada de Fourier aplicada sobre la señal de cada eje y la ventana empleada para este fin se diseñó conservando las mismas características de la ventana para análisis de amplitud:

Figura 47: Vista de la ventana de amplitud vs frecuencia en reposo.

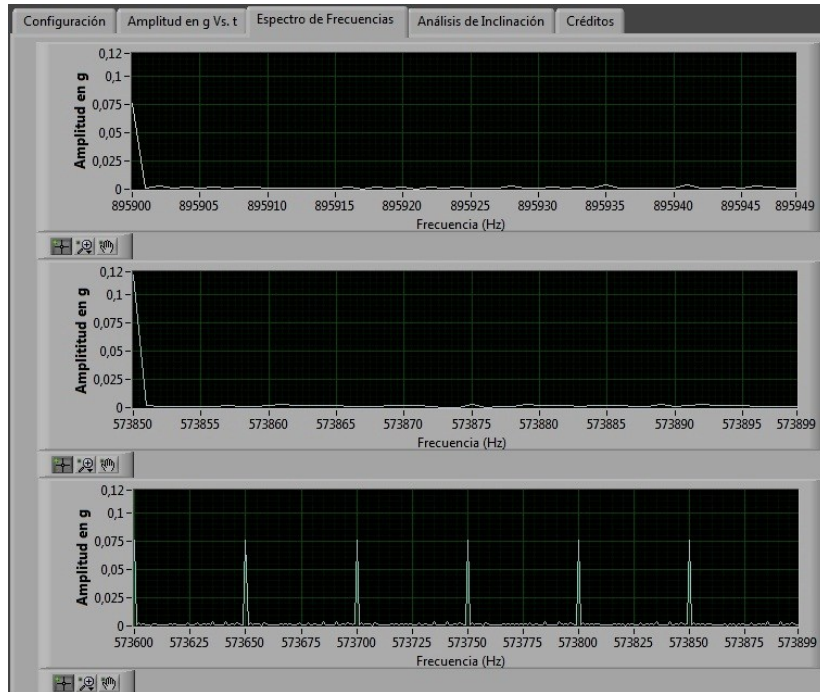
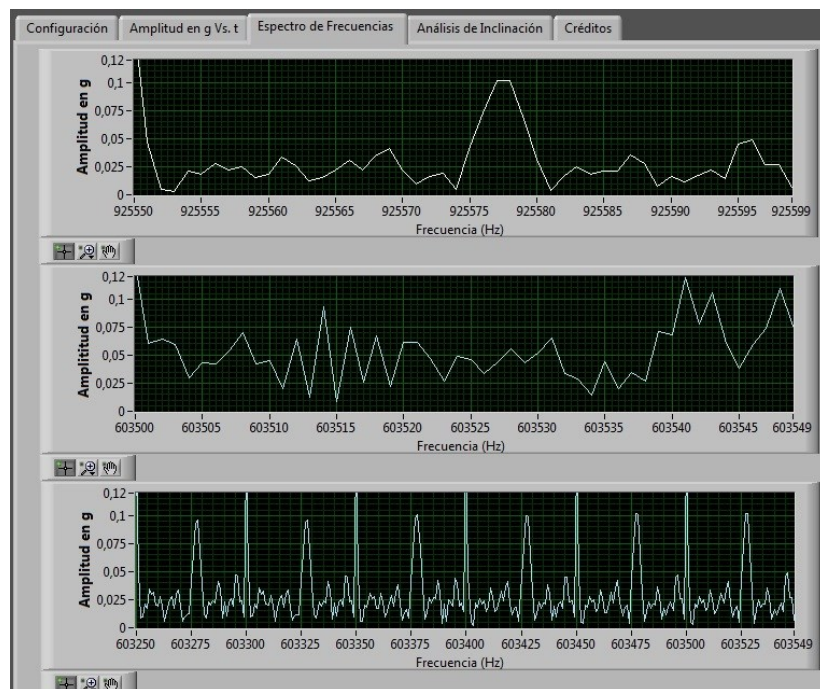


Figura 48: Vista de la ventana de amplitud vs frecuencia con perturbación.



Igualmente, y dada la inherente posibilidad de emplear el instrumento como un inclinómetro, la plataforma se concibió para albergar en una tercera pestaña, un modelo tridimensional, que permite analizar cualitativa y cuantitativamente el ángulo de inclinación en los ejes x y y:

Figura 49: Vista de la ventana del modelo tridimensional del ángulo de inclinación en reposo.

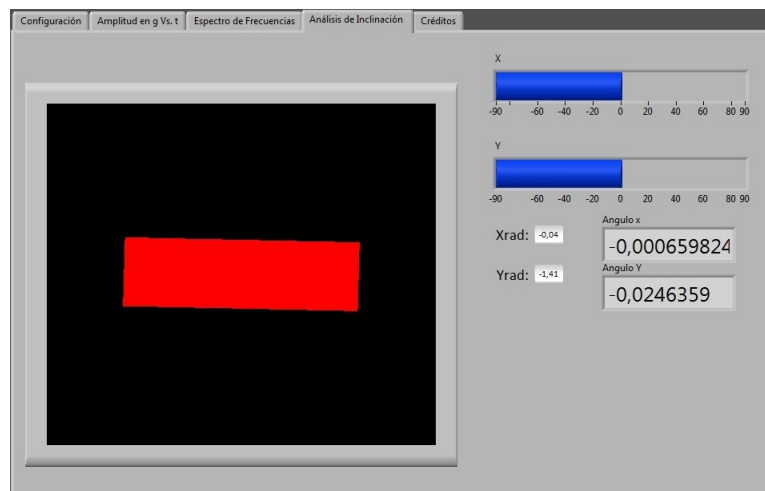
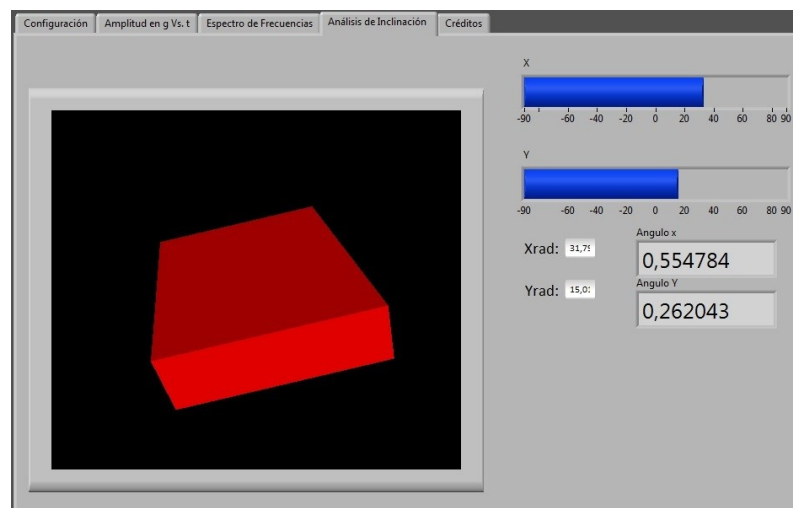


Figura 50: Vista de la ventana del modelo tridimensional del ángulo de inclinación con perturbación.



6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Tras el diseño de cada uno de los circuitos impresos de las dos tarjetas, se desarrolló el primer prototipo con tecnología “casera”, y tras la primera incorporación y soldado de todas las piezas se descubrió una gran susceptibilidad al ruido eléctrico. Tocar el sistema con la yema de los dedos en cualquiera de las dos tarjetas, o variaciones en la red eléctrica, generaban drásticos y repetidos picos en los gráficos de amplitud y espectro de la interfaz gráfica.

La primera decisión y seguramente la más importante, fue mejorar el sistema de tierra de cada tarjeta, y acoplar planos de cobre para sustentarla. De forma adicional, la fabricación de los impresos fue encargada a la empresa PCB Microcircuitos de la ciudad de Cali.

El resultado obtenido después montar las nuevas tarjetas fue sorprendentemente mejor al anterior. La susceptibilidad al contacto y a las perturbaciones de alimentación eléctrica fueron dejadas atrás por completo.

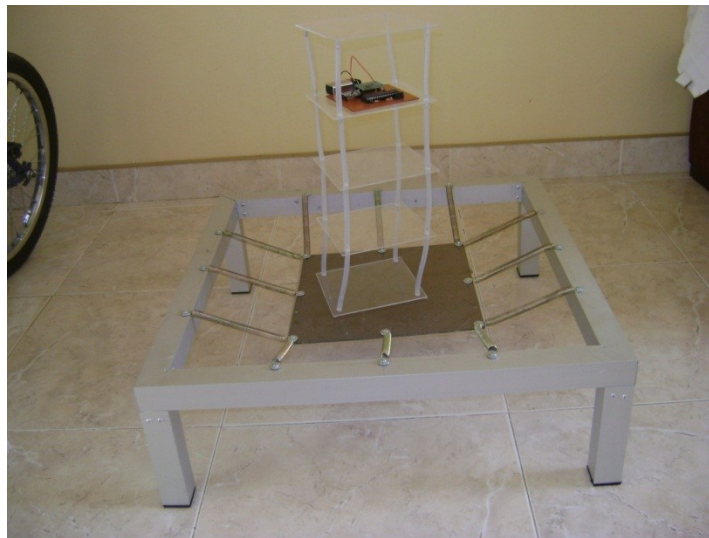
Sin embargo, se hizo evidente que a pesar de modificar la sensibilidad del acelerómetro, las vibraciones del entorno se hacían presentes en el monitoreo de variables y se sumaban a las señales analizadas. Por lo tanto fue necesario recurrir a la implementación de filtros digitales en el microcontrolador que gobierna la adquisición de las señales analógicas del acelerómetro. Se adecuó por software, un filtro “Moving Average” con una muestra de 10 medidas para el promedio.

El resultado fue el de una señal impecable en la pantalla, de los movimientos, inclinaciones y vibraciones a las que se sometió el sistema.

Se desarrolló una pequeña mesa dotada de resortes y una base para ubicar un modelo que emule en forma genérica la flexibilidad de una estructura de construcción civil y se empleó para poner prueba el equipo y analizar diferentes espectros de frecuencia y determinación de amplitudes en escala de la gravedad.

Por último cabe resaltar que el consumo de corriente de la tarjeta del acelerómetro es de 50mA a carga plena y considerando que una pila típica genera 2000mAH entonces se tiene una autonomía de 40 horas de trabajo continuo.

Figura 51: Modelo para pruebas.



Las pruebas de distancia, confirmaron la presencia de la señal inalámbrica según las especificaciones del fabricante, a 300 metros en línea de vista.

Para las pruebas de red, se consiguió en calidad de préstamo un tercer transceptor XBEE, y aprovechando una de las tarjetas desarrolladas al

comienzo, se hicieron pruebas desde la central, recibiendo los datos secuencialmente de cada una de las dos estaciones.

Finalmente y para el estado definitivo del arte, el sistema se programó en una topología de maestro – esclavo.

Finalmente, y en vista de la facilidad de la plataforma para la detección de ángulos de inclinación, se programó un modelo tridimensional, afectado en tiempo real por las señales del acelerómetro, que permitió dar al sistema una herramienta adicional que lo transforma en un inclinómetro.

7. APLICACIONES

Es inevitable, ante el desarrollo de una plataforma multipropósito, a pesar de su misión inicial, el cuestionamiento de sus posibles aplicaciones en distintas áreas, para el monitoreo y control. Las siguientes son algunas de aplicaciones más relevantes para los autores del proyecto, aunque las posibilidades son mucho más extensas y algunas inimaginables sin el punto de vista de algún requerimiento particular:

- **Sistema remoto de monitoreo en pacientes con padecimientos de temblores a causa de diferentes enfermedades.** en el futuro cercano la aplicación de nuestro dispositivo puede ayudar en el monitoreo de temblores debidos a enfermedades causadas por factores neuronales y de otros tipos sin necesidad de estar en un contacto directo con el paciente, basándose en la amplitud y la frecuencia del temblor.
- **Sistema de Monitoreo y Control de vibraciones en motores.** El sistema podría conectarse a diferentes motores eléctricos, y de combustión, que se encuentran independientes o haciendo parte de un sistema mayor, como una planta industrial, un automóvil, una motocicleta, etc. y determinar mediante comparación con modelos su desempeño.
- **Sistema de alarma en seguridad industrial y local.** este sistema puede ser acoplado a otros para la prevención y aviso de la presencia de personas o animales en horarios diferentes a los permitidos en toda la locación o en sus zonas restringidas.

- **Sistemas de Control Distribuido.** Cada estación conformada por un transceptor XBEE, permite la adquisición de datos en distintas etapas de un sistema, su procesamiento y control, y la entrega de datos a una central para la consolidación, monitoreo y control general de la planta. El hecho de que los dispositivos sean gobernados por microcontroladores, le da la versatilidad a cada estación para conectarse a cualquier tipo de sensor, bien sea de salida analógica o digital.

8. CONCLUSIONES

- El sistema desarrollado, es una completa y robusta plataforma, para el monitoreo de vibraciones y oscilaciones, así como inclinaciones, en entornos de diversa índole.
- La versatilidad del dispositivo desarrollado, permite adaptarle cualquier tipo de sensor de salida analógica, con lo que prácticamente, cualquier variable física puede ser monitoreada a través de la red implementada, aparte del acelerómetro concebido como principio fundamental del presente proyecto.
- Los transceptores de radio frecuencia que incorporan el protocolo ZIGBEE, son una poderosa herramienta para la implementación de plataformas de interconexión de sensores electrónicos en red, que permiten un monitoreo y control centralizado de diversos sectores de una planta.
- Los acelerómetros, son una eficiente elección en el campo de los transductores para el análisis de vibraciones, oscilaciones e inclinaciones, y gracias a la posibilidad de ajustar su sensibilidad, permiten su empleo en campos de altas frecuencias y pequeñas amplitudes, así como también en bajas frecuencias y grandes amplitudes.
- Las pruebas de campo efectuadas, establecen claramente que el análisis de pequeñas vibraciones (en frecuencia o amplitud) puede ser seguido en tiempo real sin dificultades a través de la interfaz gráfica de usuario. Por

lo tanto, el sistema es una eficiente herramienta para el monitoreo de vibraciones de motores y maquinaria que dependa de ellos para funcionar.

- La combinación del sistema, con elementos sensores de diversas variables físicas, convierte al proyecto desarrollado en una plataforma dinámica y multipropósito, que sirve de punto de partida para el diseño e implementación de innumerables sistemas de monitoreo y control en red, y como apoyo a distintos procesos de investigación.
- La posibilidad del monitoreo en tiempo real, permite la obtención de gráficas muy concretas para el análisis de las vibraciones en función de la amplitud y de la frecuencia. La elección del software LabView de National Instruments, fue una acertada decisión que permite la escalabilidad del instrumento y el desarrollo de poderosos elementos visuales de análisis cualitativo y cuantitativo de las variables físicas analizadas por el instrumento.
- La conexión por medio del puerto USB, brinda al sistema la posibilidad de ser monitoreado desde cualquier tipo de computador (personal o portátil) de la actualidad, e incluso, la posibilidad de interactuar con LabView en sistemas operativos diferentes a Windows, como Linux y MAC OS, para los cuales el software dispone de versiones específicas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Concepto de esfuerzo. Página de Internet: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec1/1_2.htm
- [2] Diseño y construcción de un prototipo usando un acelerómetro tridimensional para la determinación de movimientos en un vehículo. Página de Internet: <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1355/5/T%2011225%20CAPITULO%201.pdf>
- [3]. Sensores internos. Página de internet:
- [4]. Acelerómetros. Página de internet: <http://www.electrocomponentes.com.ar/articulos/agosto10/Acelerometros.htm>
- [5]. Freescale Semiconductor Technical Data: $\pm 1.5g$, $\pm 6g$ Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer. Página de internet: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361LC.pdf?fpsp=1
- [6] Estado actual de las Comunicaciones por Radio Frecuencia. Página de internet: http://www.bairesrobotics.com.ar/data/estado_actual_de_las_comunicaciones_por_radiofrecuencia.pdf
- [7] FAQ de Internet. Página de internet: <http://www.duiops.net/manuales/faqinternet/faqinternet10.htm>
- [8] IEEE 802.11. Página de internet: http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [9] el estándar ZIGBEE. Página de Internet: <http://www.scribd.com/doc/19049146/El-Standard-ZigBee>
- [10] descripción del estándar de comunicaciones de área personal IEEE 802.15.4 /"ZIGBEE" Página de Internet: <http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/123456789/815/2/T10110CAP2.pdf>
- [11] MODULOS Xbee. Página de Internet: <http://www.sigmaelectronica.net/images/TARJETA%20XBEE%20EXPLORER.pdf>

- [12] Características generales del USB. Página de internet: http://es.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus
- [13] USB. Página de internet: <http://www.monografias.com/trabajos11/usbmem/usbmem.shtml>
- [14] MICROCHIP. PIC18F452 Pagina de Internet: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010296>
- [15] MICROCHIP. PIC18F4550. Página de Internet: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010300>
- Janet L. Axelson. USB Complete: Everything You Need to Develop USB Peripherals, Third Edition; editorial Lakeview Research, 1999-2005.
- Cory L. Clark. LabVIEW Digital Signal Processing and Digital Communications. Editorial McGraw-Hill, 2005.
- Douglas A. Skoog. Principios de Análisis Instrumental, Editorial McGraw-Hill, 2001.