

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. José R. Espinoza C.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Desarrollo de Dispositivos de Bajo Costo para
medición de Vibraciones Mecánicas.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. José R. Espinoza C.

Desarrollo de Dispositivos de Bajo Costo para medición de Vibraciones Mecánicas.



Roberto Esteban Riquelme Sáez

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

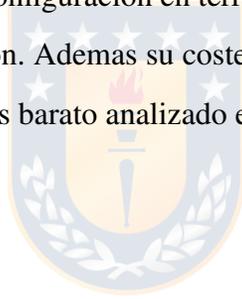
Enero 2016

Resumen

La inspección de estructuras es un proceso que consta de monitorear distintas variables, con las cuales se puede probar el correcto comportamiento y estado estructural de estas, lo cual ayuda a prever posibles colapsos y disminuir costos de mantenimiento. Una de las variables más baratas de sensorar es la vibración de las estructuras, ya que el sensor que se requiere no es invasivo, existen equipos comerciales capaces de medir aceleraciones y velocidades, que a su vez son capaces de formar redes entre sí, ya sea para sincronizarse o para agrupar la información.

En este trabajo se realiza el diseño, análisis, construcción y pruebas de una red de sensores inalámbricos, capaces de medir de vibraciones mecánicas a un bajo costo.

Finalmente se obtuvieron dos prototipos capaces de formar una red de sensores inalámbrica, que poseen distintos sensores y sensibilidad, se mantiene la modularidad de los equipos comerciales y la topología fija que estos traen, pero la configuración en terreno de estos es más simple y no requiere el uso de computadores para su instalación. Además su coste de fabricación es inferior a la quinta parte del costo actual del nodo comercial más barato analizado en este documento.





A mis padres, por impulsar mis sueños.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, por cultivar mi curiosidad y darme esta hambre insaciable por aprender, en especial a mis padres por ser mis guías en este camino. También quiero agradecer a mis amigos y amigas que me brindaron todo el apoyo que he necesitado en esta etapa, a Claudia, mi polola, por acompañarme en este camino, a Karen y Daniela, pese a la distancia siempre han estado a mi lado, a Pablo, un gran amigo en las buenas y en las malas.

Agradezco a mis profesores, en especial al Profesor Fernando Cerda, por las distintas oportunidades que me ha dado en temas de Ingeniería Civil y al Profesor José Espinoza, que desde el comienzo de mi carrera universitaria ha estado apoyando distintos proyectos que he llevado a lo largo de estos 6 años, por el apoyo incondicional brindado este último año y por permitirme ser parte de la familia del LCDA, en donde recibí un gran apoyo y una cálida estadía.



Tabla de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Introducción General	1
1.2. Trabajos Previos	2
1.2.1. Implementación de Transmisión Inalámbrica para el monitoreo de estructuras.	2
1.2.2. Análisis de Estructuras Grandes con Altos Costes de Verificación.	3
1.2.3. Utilización de Radars interferométricos con red Xbee.	3
1.2.4. Análisis Modos de operación	4
1.2.5. Desempeño de Dispositivos Comerciales	4
1.2.6. Sistema de Monitoreo	5
1.2.7. Análisis Teorema de Nyquist y FFT	6
1.2.8. Construcción de Filtros	6
1.2.9. Análisis de Circuitos Análogos	6
1.2.10. Convertidor DC/DC	7
1.2.11. Diseño de Red de Sensores Inalámbricos	7
1.2.12. Equipos Actuales en el Mercado	8
1.2.13. Discusión	8
1.3. Hipótesis del Trabajo	9
1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo General	9
1.4.2. Objetivos Específicos	9
1.5. Alcances y Limitaciones	10
1.6. Metodología	10
2. Diseño	12
2.1. Introducción	12
2.2. Elección del Microcontrolador	14
2.3. Obtención de datos	14
2.4. Almacenamiento de datos	16
2.5. Red de Equipos	16
2.6. Sincronía	16
2.7. Autonomía	17
2.8. WIFI	17
2.9. Diagrama General	18
3. Desarrollo	20
3.1. Acondicionamiento Señal	20
3.2. Manejo de Sensores Análogos	23
3.3. Utilización de Acelerómetros	23
3.4. Tarjeta SD	24
3.5. Control de acceso al medio	25
3.6. Distribución carga (o tiempo) del Microcontrolador	28
3.7. Alimentación y batería de respaldo	30

4. Resultados	33
4.1. Introducción	33
4.2. Resultados V.1	33
4.3. Resultados V.2	36
4.4. Resultados V.3	37
4.5. Resultados V.4	39
4.6. Funcionamiento de equipos	40
4.7. Precios	44
5. Pruebas	46
5.1. Prueba de sensores	46
5.2. Prueba de demora en sincronización	46
5.3. Prueba de fallas	47
5.3.1. Falla Nodo Esclavo	47
5.3.2. Falla Nodo Maestro	48
5.4. Prueba de Distancia	48
5.5. Prueba del sistema de comunicación	48
6. Conclusiones	50
6.1. Sumario	50
6.2. Conclusiones	50
6.3. Trabajo Futuro	50
Bibliografía	52
Anexo A: Códigos	54
A.1. Main y Loop, main.h	54
Anexo B: Datasheets	62
B.1. STM32F4 Discovery	62
B.2. Acelerómetro ADXL335	64
B.3. Adaptador SD	65
B.4. Geófono	66
B.5. Acelerómetro y giroscopio, MPU-6050	68
B.6. Acelerómetro, LIS331HH	69
B.7. Transceiver, RFM12B	70
B.8. Conversor Análogo Digital 16Bit, ADS8331	71
B.9. Módulo Wi-Fi, ESP8266	72
B.10. Módulo Antena RF 2.4Ghz, NRF24	73
Anexo C: Manual	73
C.1. Configuración predeterminada	74
C.2. Modo de Uso	74
C.3. Extracción de datos	74



Lista de Tablas

1.1. Características principales equipos comerciales	2
1.2. Características Generales	9
2.1. Características de los Microcontroladores	14
2.2. Características de los acelerómetros	15
4.1. Precios Placa Acelerómetros Fabricada.	44
4.2. Precios Placa Geófonos Fabricada.	44
4.3. Precio Placa Acelerómetros simplificada.	45
4.4. Precios Placa Geófonos Simplificada.	45



Lista de Imágenes

2.1.	Diagrama General del Equipo de Acelerómetros Propuesto.	18
2.2.	Diagrama General del Equipo de Geófonos Propuesto.	19
3.1.	Diagrama de Acondicionamiento de Señal.	20
3.2.	Diagrama del Circuito Propuesto.	21
3.3.	Diagrama de Bode Circuito de Acondicionamiento.	22
3.4.	Data 'RAW'.	24
3.5.	Diagrama TDMA.	25
3.6.	Diagrama CSMA.	26
3.7.	Tiempo de carga dispositivo digital.	28
3.8.	Esquema propuesto para circuito de respaldo.	30
3.9.	Curvas características de baterías de Litio	31
3.10.	Subcircuitos.	31
4.1.	Diagrama de Funcionamiento de Prototipo V1.	33
4.2.	Circuitos Impresos V.1.	34
4.3.	Prototipos V.1.	35
4.4.	Programa de Visualización.	35
4.5.	V4Mini.	36
4.6.	Nodo Geófonos con caja	37
4.7.	Nodo con Acelerómetros	37
4.8.	Interfaz Nodo Geófonos	38
4.9.	Interfaz Nodo Acelerómetros	38
4.10.	Nodo Versión 4 acelerómetros, STM32F4.	39
4.11.	Nodo Versión 4 acelerómetros, STM32F1.	40
4.12.	Diagrama de Funcionamiento Inicial de los nodos	41
4.13.	Ciclos básicos Dispositivo Maestro	42
4.14.	Ciclos básicos Dispositivo Esclavo	42
5.1.	Análisis Señales	46
5.2.	FFT señal Geófonos	47

Nomeclatura

WSN: Wireless Sensor Network

MEMS: Microelectromechanical Sensors

STFT: Short-Time Fourier Transform

FFT: Fast Fourier Transform

AC: Alternating Current

DC: Direct Current

AC/DC: Alternating to Direct Current

DC/AC: Direct to Alternating Current

DC/DC: Direct to Direct Current

ADC: Analog to Digital Converter



1. Introducción

1.1. Introducción General

La inspección de estructuras está tomando fuerza alrededor del mundo, este es un proceso que debiera estar presente desde el momento que se comienza con la etapa de diseño y consiste en monitorear distintas variables para probar el correcto funcionamiento y rendimiento de las estructuras.

Para poder inspeccionar estructuras se necesita instrumentación y con ésta ir sensando en distintas etapas de la construcción para asegurar la integridad de las estructuras, ya que el costo de una falla es muy alto [1]. Las estructuras comúnmente inspeccionadas son puentes, represas, edificios, aviones, maquinarias pesadas, entre otros.

El proceso de la inspección no termina cuando la construcción está finalizada, es solo el comienzo, una vez que la obra está terminada comienza su uso, lo que conlleva a distintas perturbaciones que pueden afectar las estructuras, deteriorar los cimientos, llegando hasta a colapsar edificaciones.

En Chile, luego de los desastres naturales que han ocurrido, se ha comenzado a crear conciencia sobre la importancia de este tema, lo que queda al descubierto con los decretos 117 y 118 creados tras el terremoto ocurrido el 27 de febrero de 2010.

Hoy en día mantener sistemas capaces de monitorear constantemente una estructura tiene un gran valor asociado, ya que los sensores para medir algunas variables son muy caros, como las celdas de presión o sondas, pero a su vez se ha comenzado a estudiar otros métodos, con otras variables de interés, como lo son las vibraciones, las cuales se pueden utilizar con los mismos fines.

Existen muchos productos finales que entregan mediciones de vibraciones ambientales en periodos acotados de tiempo para análisis de estructuras y análisis de sismos, ver Tabla 1.1.

La idea de crear un prototipo surge debido a las desventajas que poseen los equipos actuales, de esta forma poder llegar a un prototipo con características de mediciones sean similares a los actuales, agregar funcionalidades y descartar otras innecesarias para la aplicación que se perfila este equipo.

	Tromino	MicroStrain
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Mide Micro-vibraciones. • Cofre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño compacto de nodos. • Forma una red de sensores inalámbricas con equipos dedicados.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Precio. • Sincronización mediante GPS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precio. • Manejo de pérdida de datos. • Memoria centralizada.

Tabla 1.1: Características principales equipos comerciales

1.2. Trabajos Previos

A continuación se describe con detalle la bibliografía para explicar el entorno, proyectos anteriores y lo esencial para llevar a cabo este proyecto.

1.2.1. Implementación de Transmisión Inalámbrica para el monitoreo de estructuras.

[4] D. H. Wang and W. H. Liao, "Instrumentation of a wireless transmission system for health monitoring of large infrastructures." in *Instrumentation and Measurement Technology Conf*, May. 2001, Proceedings of the 18th IEEE, pp. 634-639.

Este artículo es antiguo, muestra las topologías de cómo implementar la transmisión inalámbrica, en donde los sensores y el módulo de transmisión no se encuentran físicamente en el mismo equipo, toda la información se redirige al computador donde se hacen análisis offline.

Pese a ser antigua la tecnología utilizada, ya que la evolución tecnológica se ha desarrollado muy rápidamente estos últimos años, las topologías de como colocar los nodos es uno de los temas que se tocan en este artículo, se muestra que los sensores no tienen que ir necesariamente con la antena cosa que hoy en día ya casi no se cuestiona pero para ciertas aplicaciones puede ser realmente útil, se pueden desarrollar extensiones de sensores o nodos más pequeños para que el equipo no sea necesariamente grande y se pueda ajustar según su uso.

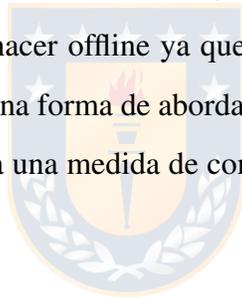
1.2.2. Análisis de Estructuras Grandes con Altos Costes de Verificación.

[5] T. G. H. Basten and F. B. A. Schiphorst, "Structural health monitoring with a wireless vibration sensor network," in *ISMA Conf. on Noise and Vibration Engineering*, Jan. 2012, pp. 35-47.

En este trabajo remarca la importancia del monitoreo de estructuras cuando el coste de verificación de estas es alto, como en el caso señalado de turbinas eólicas en la costa. Con esta gran cantidad de dispositivos necesarios es muy difícil transmitir toda la información para hacer un análisis descentralizado de este.

Lo que se plantea en el documento como solución es hacer un procesamiento descentralizado, es decir, realizar un procesamiento en los microprocesadores que también están encargados de los sensores y solo enviar esta información.

Esta es una gran ventaja ya que la cantidad de información transmitida es mucho menor ya que tiene un procesamiento que resume los datos obtenidos, la gran desventaja es que se dejan de lados otros tipos de análisis que se pueden hacer offline ya que se descartarían los datos por el coste que implicaría ir a buscarlos físicamente. Una forma de abordarlo que se probará a futuro será ocupar esta técnica pero también el pre-análisis sea una medida de compresión de la información y para que esta no se pierda.



1.2.3. Utilización de Radares interferométricos con red Xbee.

[6] C. Gu, J. Rice and C. Li, "A wireless smart sensor network based on multi-function interferometric radar sensors for structural health monitoring," in *Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), 2012 IEEE Topical Conf*, Jan. 2012, pp. 33-36.

En este trabajo se presenta el estudio de estructuras mediante sensores de radares interferométricos, que además de ser de bajo costo, no tienen que estar adheridos a la superficie, pero aún así se logra observar variaciones y/o deformaciones en la superficie estudiada. Un punto muy relevante de este trabajo es el uso de dispositivos Xbee, que son capaces de formar redes mediante el uso del protocolo Zigbee.

El trabajo aprovecha la red inalámbrica de estas antenas y configura a los nodos de sensores como 'End Devices' por lo cual su objetivo es nada más que sensar e enviar la información al coordinador, los 'Routers' ubicados estratégicamente para enviar paquetes de datos, retransmitir la información

enviada desde los 'End Devices' y sensor pero en menor medida para poder enviar toda la información al 'Coordinator' que en este caso es el computador. Esta topología generada por las antenas es la que se tratará de aprovechar en este documento.

1.2.4. Análisis Modos de operación

[7] T. D.Tan, N. T. Anh and G. G. Anh, "Low-cost Structural Health Monitoring Scheme Using MEMS-based Accelerometers," in *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), Second International Conf*, Jan. 2011, pp. 217-220.

En este documento se señala que para el monitoreo de estructuras, es de vital importancia el análisis de vibraciones, ya que con este se logra detectar daños en las construcciones y el lugar de estos daños, además se recalca que gracias al gran desarrollo de los MEMS, los acelerómetros han bajado su costo considerablemente. En el documento presentado, se usan los equipos de 2 modos, en modo online en el cual se realiza una STFT de los datos tomados y en modo offline con los datos guardados se utiliza DIAMOND que es una toolbox gratuita de MATLAB.

Es de gran interés el modo online que se propone para este equipo, ya que una Transformada de Fourier con un suficiente número de puntos puede servir para reconstruir en totalidad la forma de onda muestreada, con lo que la cantidad de datos que se tiene que enviar y almacenar es mucho menor con lo que se ahorraría espacio de almacenamiento, tiempo de transmisión y consumo de batería de los equipos.

1.2.5. Desempeño de Dispositivos Comerciales

A continuación se presentan algunos ejemplos de como se utilizan los dispositivos comerciales, para tener en cuenta las características antes de comenzar a desarrollar un prototipo.

[8] S. N. Pakzad, S. Kim, G. L. Fenves, S. D. Glaser, D. E. Culler and J. W. Demmel, "Multi-purpose wireless accelerometers for civil infrastructure monitoring." in *Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Sep. 2005.

Se utilizó el ADXL202 (acelerómetro MEMS de bajo costo) y SiliconDesign1221 (acelerómetro de un eje de alta sensibilidad y bajo ruido) junto al dispositivo Mica-2 con lo cual se logra medir grandes vibraciones tal como terremotos y además vibraciones naturales, las pruebas realizadas tienen

una frecuencia de 200Hz de muestreo durante 4 minutos, con 12 nodos en total.

[9] J. Paek, K. Chintalapudi, J. Caffrey, R. Govindan, and S. Masri, "A wireless sensor network for structural health monitoring: Performance and experience.", Center for Embedded Network Sensing, 2005.

En este artículo se evalúa y se experimenta con equipos comerciales (Mica-2 y Mica-Z), se intenta explotar la máxima capacidad de los equipos y de los protocolos de comunicación en las que los equipos son capaces de trabajar. Los resultados de este trabajo muestran que los equipos son capaces de trabajar a una frecuencia de 200Hz en una topología de 14 nodos, en el peor de los casos esta frecuencia puede ser de 36Hz.

[10] S. N. Pakzad, G. L. Fenves, S. Kim, and D. E. Culler, "Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring," *Journal of Infrastructure Systems*, 2008.

En este documento se presenta un diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos, en la cual se tiene una frecuencia de muestreo alta, para poder suplir la pérdida de información al transmitir los datos, se utilizan 2 acelerómetros con distintas escalas para poder medir vibraciones naturales y posibles eventualidades como un sismo.

Se utiliza TinyOs para manejar la red de sensores, para la transmisión de datos se utiliza el método de Multihop, por lo que la información va rebotando en cada equipo entremedio y para poder llevar a cabo esto se utiliza un flujo de información mediante pipeline.

Como se observa los análisis son por un tiempo corto y tienen gran pérdida de información en el caso de que se aumente el número de nodos, la forma de ir realizando los saltos de un equipo a otro hasta que la información llegue a uno central, ocupa gran cantidad de recursos que se pretenden ahorrar con el uso del protocolo Zigbee.

1.2.6. Sistema de Monitoreo

[11] E. Mayorga and F. Cerda, "Consideraciones para el diseño de sistemas de monitoreo de puentes" in *Conf. First International Bridges Conference – Chile 2014, Future Challenges: Design, Construction and Maintenance*, Santiago, Chile, Sep. 2014.

En esta presentación se describen las consideraciones generales para el diseño de sistemas de medición y adquisición de datos, como la disponibilidad de energía, adaptabilidad de hardware, robustez y confiabilidad, transmisión de datos, almacenamiento y administración de datos. También se menciona

que se incorporarán instrumentación para el monitoreo estructural para puentes en licitación.

Establece importantes parámetros que debe tener un sistema de instrumentación tales como varias estaciones de adquisición, muestreo de señales de vibración entre 100 y 200Hz, sensores de temperatura y de humedad. Finalmente hace una breve descripción de las variables a medir. De este artículo se basarán los parámetros para la confección del prototipo.

1.2.7. Análisis Teorema de Nyquist y FFT

[12] R. K. R. Yarlagadda, *Analog and Digital Signals and Systems*, Vol. 1, New York: Springer, 2010.

Este libro hace énfasis en manejo de señales tanto análogas como digitales, tiene varios capítulos que hacen referencia a la transformada de Fourier además menciona el teorema de Nyquist el cual fija la frecuencia para que no se pierda información al sensar una señal y como es de interés aplicar la FFT se tienen que los datos tienen que ser una exponencial de 2.

Para una etapa posterior cuando la transmisión de información sea un problema relevante (número grande de nodos) se estudiará la utilización de la transformada de Fourier, el más exacto que pueda realizar la tarjeta de desarrollo para poder comprimir información y hacer un análisis preliminar.

1.2.8. Construcción de Filtros

[13] C. J. Savant Jr, M. S. Roden and G. Carpenter, *Diseño Electrónico*, 3era ed. Prentice-Hall, cap. 13.

Para la construcción de Filtros este libro es un gran apoyo ya que los ejemplos que trae son muy didácticos, específicamente en el capítulo 13 se encuentran los filtros activos que son los que se ocuparán para acondicionar la señal del prototipo.

1.2.9. Análisis de Circuitos Análogos

[14] M. Thomsom, *Intuitive Analog Circuit Design*, 2nd ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014.

Este libro contiene aproximaciones de como realmente actúan los componentes análogos y la diferencias en comparación con la simulación. Además posee un breve resumen de que es una cadena digital de procesamiento de señales. Esto hay que tenerlo en consideración a la hora de la construcción

de la PCB final para las pistas de comunicación y de adaptación de la señal análoga.

1.2.10. Convertidor DC/DC

[15] R.W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, New York, USA, 2001.

En el libro se presentan diferentes modelos de convertidores AC/DC y DC/DC, se propone utilizar un conversor AC/DC comercial y un convertidor DC/DC basado en un circuito integrado con realimentación, puede que este último no sea tan eficiente como se espera, por lo que se pretende diseñar un convertidor DC/DC para una mayor autonomía, en caso que la red eléctrica no se encuentra disponible y que acepte distintos tipos de batería.

1.2.11. Diseño de Red de Sensores Inalámbricos

[24] Y. Zhang, L. T. Yang and J. Chen *RFID and Sensor Networks: architectures, protocols, security, and integrations*, CRC Press, New York, USA, 2010.

Este libro es de gran ayuda para entender y aprender los detalles de las redes de radiofrecuencia y que son las redes de sensores inalámbricas. Aquí se describen los objetivos que hay que tener en mente al momento de buscar, comprar o diseñar una WSN, además aborda temas particulares, como la seguridad, eficiencia, rutas, algoritmos de anti-colisión, entre otros, que son necesarios considerar para tener un equipo más robusto.

Además da a conocer las ventajas y desventajas de distintos métodos actuales y da posibles sugerencias o mejoras que se pueden estudiar, plantea desafíos que se pueden unir a los requerimientos de la sección de Sistemas de Monitoreo para poder plantear un equipo con características más refinadas.

[25] R. Xie and X. Jia "Transmission-efficient clustering method for wireless sensor networks using compressive sensing." in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 2014, vol. 25, no 3, pp. 806-815.

En este trabajo se presentan estudios de transmisión de datos en redes de sensores, comprimiendo la información a enviar, con un tal de aumentar la eficiencia del equipo, tanto en el consumo de energía y disminuyendo el tráfico de información.

1.2.12. Equipos Actuales en el Mercado

Entre las empresas más reconocidas en soluciones de WSN para el monitoreo de estructuras se encuentran las siguientes:

Microstrain, con varios productos, los cuales se dividen en 3 categorías, los nodos, los "gateway"(o re-transmisores) y el software para poder conectarse al computador.

- Los nodos que analizan vibraciones tienen acelerómetros, los cuales se les puede ajustar la frecuencia y el eje que se quiere medir.
- Los dispositivos "gateway" son los que recolectan la información de los nodos ya que la memoria de estos es muy limitada y traspasa esa información al computador y/o la envía.
- El Software ayuda a configurar el sistema, añadiendo nodos y extraer los datos.

El precio de cada nodo es de USD500 y de cada Gateway es de USD1000 más costes de envíos y el impuesto entrar al país.

Micromed Geophysics, a través de sus equipos robustos que llevan el nombre de Tromino, son equipos encapsulados capaces de medir vibraciones ambientales muy pequeñas, mediante geófonos, el equipo básico capaz de medir velocidades, posee puertos de expansión para poder sincronizar varios equipos vía cable o GPS.

El precio del equipo es de alrededor de los CLP \$ 8,000,000.

1.2.13. Discusión

Como se puede ver en la literatura antes señalada, los equipos se modifican para cada aplicación, pero aún así existe un gran espacio para el desarrollo de equipos más potentes y con mejoras significativas, como probar distintos tipos de sensores, protocolos de comunicación y algoritmos de compresión y análisis.

Se requiere crear un dispositivo moldeable al uso empresarial, que sea de bajo costo para su masificación y tener cada vez más estructuras monitoreadas.

Para implementar un sistema de monitoreo se requieren características que aun no están implementadas a cabalidad o no están reunidas en un solo equipo, en la tabla 1.2 se aprecia las que se abordan en este trabajo.

Características a mejorar	Características a agregar
<ul style="list-style-type: none"> • Cuando el router no recibe una señal, repite el último dato recibido. • Mayor capacidad de memoria. • Precio 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregar memoria descentralizada para cada nodo. • Energía de respaldo. • Instalación sin necesidad de computador.

Tabla 1.2: Características Generales

1.3. Hipótesis del Trabajo

- Es posible diseñar y construir un prototipo que cumpla con las funciones básicas señaladas en [11], que resulte más barato que los equipos comerciales y que su desempeño sea comparable con los equipos existentes.



1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Diseñar, construir y programar prototipos capaces de medir movimientos ambientales fuertes que tengan capacidad de comunicación entre si y que permita el acceso de la información a través de un computador.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Lograr que el equipo sea replicable para poder hacer monitoreo de los modos de las estructuras.
- Reducir costos ocupando sensores de bajo costo pero a su vez explotando su máxima capacidad.
- Dejar un dispositivo para que personas no especializadas en el área de Ingeniería Civil Electrónica puedan ocuparlo.

1.5. Alcances y Limitaciones

- Junto con el desarrollo del prototipo se creará un manual de uso, con el fin de que sea utilizable por una persona no especialista en el área.
- El proyecto en si sirve como punto de partida para equipos que necesiten como base los mismos tipos de sensores, por lo que en el código se documentará para agregar funcionalidades extras.
- La batería es una gran desventaja en este tipo de sistemas por lo cual se plantearán alternativas para que el producto tenga autonomía en caso de cortes de luz pero que no necesite estar cambiando de batería en periodos cortos de tiempo.
- La descarga hacia ordenadores será a través de un software a implementar que se encargue de recibir los datos y transformarlos en información legible para el usuario.
- Este es un trabajo inicial, que está enfocado en generar un producto bien acabado y completamente funcional, por lo que todo software y hardware que se implemente debe quedar documentado ya que puede servir para futuras versiones del prototipo.
- Para el desarrollo del prototipo se ocupará la serie de tarjetas de desarrollo que contienen los microcontroladores STM32F, además de ser muy poderoso, las tarjetas de desarrollo vienen con periféricos muy útiles para este tipo de aplicaciones, como giroscopio, acelerómetro, entre otros.

1.6. Metodología

A continuación se explica la metodología que se sigue para llevar a cabo los objetivos planteados.

Para la creación de los códigos y la carga de este a los microcontroladores se utiliza Coocox IDE, con GNU GCC compiler, que es capaz de compilar códigos en C y en C++.

La creación de la interfaz se realizará mediante C++ y Python, se comparará el desempeño de ambos lenguajes, para poder decidir cual será el definitivo, los programas asociados son Qt Creator, Codeblocks para el lenguaje C/C++ y Spyder para programar en Python.

La simulación de los circuitos se llevará a cabo mediante Proteus y el diseño de circuitos se llevará a cabo en Eagle.

Los ensayos se llevarán a cabo en plataformas en las cuales se pueden excitar con frecuencias pre-determinadas mediante frecuencias de audio (generador de funciones) y las mediciones se contrastarán con equipos comerciales.



2. Diseño

2.1. Introducción

El diseño es la primera etapa para el desarrollo de cualquier prototipo o dispositivo, para esto se plantean las necesidades que se desea suplir, las funcionalidades y objetivos que se espera obtener.

Para el diseño de una red de sensores inalámbricos hay que tener en cuenta que la red tendrá múltiples restricciones como la memoria, la energía y la capacidad de procesamiento, distintos trabajos y literaturas definen algunos de los desafíos que hay que tener en cuenta al momento de diseñar, algunos de estos son:

- Escalabilidad: Se asume que la red de sensores inalámbricos contará de un gran número de dispositivos por lo tanto debe ser capaz de manejar gran cantidad de datos.
- Limitación del consumo de energía: La mayoría de las veces los nodos solo trabajan con batería por lo que tiene que ser eficiente.
- Limitación de memoria y procesamiento: Los nodos constan de una memoria y capacidad de procesamiento finita que debe ser aprovechada al máximo.
- Adaptabilidad a las dinámicas de la red: La red debe adaptarse frente a los cambios de topología, ya sea por fallas o por eventos que puedan surgir.
- Coste del equipo: Se debe minimizar el coste del equipo y el coste de colocación en el lugar donde se planea medir y si un nuevo equipo es colocado debe reutilizar la red existente.

Como se menciona anteriormente se toma en consideración las especificaciones mencionadas en [11] para llevar a cabo el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en WSN, los puntos claves del documento son:

- Frecuencia de muestreo a 200Hz.
- Respaldo eléctrico.
- Redundante en el almacenamiento de datos.

- Que el sistema pueda continuar en funcionamiento incluso si algunos de sus nodos dejan de funcionar.

Las principales debilidades detectadas en los equipos comerciales son:

- En caso de que un equipo deje de funcionar, independientemente del alcance o por batería, los datos de este se pierden (Microstrain).
- Al momento de sincronizar los nodos se tienen que hacer mediante el computador (Microstrain).
- Al sincronizar los nodos estos deben de tener cableado o gps, si no es posible el cableado se debe utilizar el gps y si el equipo está en el interior de una estructura en la cual no tiene señal no se puede sincronizar de forma precisa (Tromino).
- Al añadir mayor número de sensores menor es la frecuencia de muestreo de los sensores (Microstrain).
- Memoria centralizada, sin redundancia (Microstrain).



2.2. Elección del Microcontrolador

En la elección del microcontrolador se tuvieron en mente muchos parámetros, siendo los más importantes el número de periféricos, precio (incluyendo el precio del programador), programas, lenguajes de programación que soporta y que tan fácil es la obtención de este en caso de emergencia.

Los microcontroladores que cumplen con las características antes mencionadas son de la gama de STM32F, de 32-bit, basados en ARM. La marca ST desarrolla tarjetas de desarrollo con estos microcontroladores, las cuales integran una gran variedad de sensores conectados a los periféricos, entre estos el programador, lo que simplifica mucho el trabajo futuro. De la gama STM32 se eligieron 2 debido a las tarjetas de desarrollo asociadas a estos, el STM32F401VC y STM32F103C8. A continuación se presenta la Tabla 2.1 donde se resume las principales características de cada uno.

Microcontrolador	STM32F401VC	STM32F103C8
Frecuencia máxima	84MHz	72MHz
Memoria Flash	256Kbytes	64 Kbytes
SRAM	64 Kbytes	20 Kbytes
Conversor AD	1 x 12-bit	2 x 12-bit
Timers	11(16-bit, 2 de 32-bit)	7 (16-bit)
I2C	3	2
USART	3	3
SPI	4	2

Tabla 2.1: Características de los Microcontroladores

2.3. Obtención de datos

Para obtener los datos de interés es necesario constar de sensores, los cuales tienen que ser capaces de medir las vibraciones mecánicas del medio, para esto, los más utilizados son los acelerómetros y los geófonos, capaces de medir aceleración y velocidad del medio respectivamente.

Según el trabajo realizado por E. Mayorga y F. Cerda en [11], las frecuencias de interés van desde los 0,1Hz a 100Hz, a través del análisis de estos datos se puede detectar los distintos modos de las estructuras.

Luego de la búsqueda de sensores se eligieron los siguientes componentes, los acelerómetros ADXL335, LIS331, MPU6050 y el geófono SM-24 (Ver anexo B).

Los acelerómetros elegidos se comunican de 3 formas distintas con el microcontrolador, por lo que la forma de implementar cada uno será diferente. En la Tabla 2.2 se presenta un resumen las características de cada uno.

Acelerómetro	Salida	Rango	Resolución
ADXL335	Análoga	$\pm 2g$	Depende del Conversor
LIS331	SPI	$\pm 6g$	16Bit
MPU6050	I2C	$\pm 2g$	16Bit

Tabla 2.2: Características de los acelerómetros

El geófono es un dispositivo análogo que consiste en una bobina que rodea a un imán colgando de un resorte. Este sensor es capaz de medir vibraciones muy débiles y su dinámica queda definida por la constante del resorte, este dispositivo solo arroja una señal análoga en la salida, que es una diferencia de voltaje, por lo que se prevee que la señal de la salida tendrá que pasar por una etapa de acondicionamiento.



2.4. Almacenamiento de datos

La lectura de los distintos sensores debe de ser guardada para poder analizar los datos, para esto se requiere una grán cantidad de memoria ya que se obtienen datos de cada sensor a una frecuencia de 200Hz, para esto la memoria del microcontrolador no es suficiente, por esto se requiere utilizar algún tipo de memoria externa, como una micro SD.

La forma de almacenar los datos debe de ser eficiente, que pueda detectar si el equipo se reinició, en caso de no remover la información, significará que esta no era relevante y se seguirá reescribiendo de forma circular.

2.5. Red de Equipos

Los equipos están pensados para ser colocados en distintas partes de una misma estructura o en distintas estructuras, en algunos casos se pondrán varios equipos, como cada equipo guarda su información es posible que se manejen muchas tarjetas SD o que algunos equipos se tengan que colocar en lugares fijos donde no es posible retirar los datos con una gran frecuencia y en otros si.

Por lo antes señalado los equipos necesitan una forma de centralizar los datos o desplazarla hacia algunos nodos específicamente, entonces necesitan tener un método de comunicación.

Para crear la comunicación equipo a equipo, se requiere el uso de antenas de radiofrecuencia, las antenas comerciales son de 2.4Ghz ya que este es el ancho de banda libre para transmitir en Chile.

2.6. Sincronía

El objetivo principal del dispositivo es obtener datos de las estructuras para el posterior análisis, pero estos análisis pueden requerir datos de más de un sensor y que estos estén sincronizados, ya que a partir de los datos se puede reconstruir estructuras complejas dependiendo de donde se posicionen los sensores.

La sincronía se puede lograr mediante varios medios, la forma más barata, que es la que se implementa aquí, es aprovechar el sistema de radiofrecuencia para sincronizar las señales.

2.7. Autonomía

El equipo tiene que tener al menos 3 modos de alimentación, mediante corriente alterna (o transformador), mediante batería y utilización mixta con batería de respaldo, es decir que si se corta el suministro la batería no deje que el equipo se apague y cuando este vuelva (si vuelve antes de que la batería se agote) cargue la batería.

Estas necesidades surgen según el lugar donde se coloque el equipo, o si hay cortes inesperados del suministro, como lo que ocurre después de los sismos.

Para el equipo se pueden diseñar distintos tipos de funcionamientos mixtos, los cuales se tendrán que evaluar según la carga que lleve el microcontrolador, como por ejemplo que la batería pueda ser monitoreada y según esto pueda ser cargada o desconectada para prevenir algún tipo de daño o si esta se deja cargando como lo que hacen los cargadores convencionales.

2.8. WIFI

En las redes de sensores inalámbricas existe la posibilidad de agrupar la información hacia un nodo para la extracción de datos, no siempre la extracción de estos puede ser efectuada removiendo la memoria SD, por lo que se necesita otro método de extraer los datos y no tener un equipo especializado, es decir que no sea otro nodo. Para esto se propone que los nodos tengan módulos wifi, para la extracción de los datos de forma autónoma.

Con una mayor cantidad de nodos teniendo wifi las topologías que se pueden crear son variadas, ya que los datos se pueden concentrar en distintos dispositivos y ser enviados por determinados nodos o por todos, estos grupos que se pueden formar para el envío de datos se le llama "cluster".

2.9. Diagrama General

Se pretenden construir 2 tipos de equipos, cuya principal diferencia entre ambos será la magnitud y tipo de vibraciones que se quiera medir con ellos, es decir, el tipo de sensores que se incluirán en cada uno, ya que el la magnitud de vibraciones que pueden sensor los geófonos versus los acelerómetros es muy grande y el precio de los geófonos es muy alto comparado con los acelerómetros como para que le suban el precio al nodo por algo que quizás no se desea utilizar en conjunto.

A continuación se presenta el diagrama General de los prototipos en el cual se agrupan las partes fundamentales que estos deben tener, donde se muestran los periféricos a usar y las partes visibles al usuario.

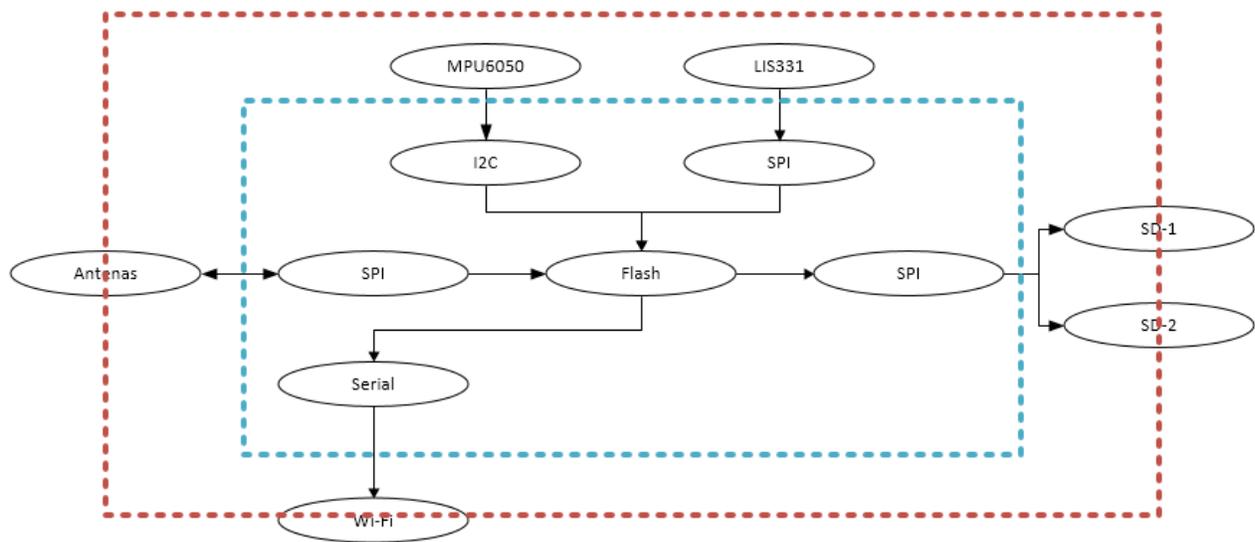


Figura 2.1: Diagrama General del Equipo de Acelerómetros Propuesto.

En los diagramas, el rectángulo celeste representa el microcontrolador, el cuadrado rojo lo que va adentro del equipo y afuera de este rectángulo lo visible por el usuario, mientras menor sea el recubrimiento de las antenas, tanto wifi como de radiofrecuencia menor es la pérdida de rango efectivo que sufren.

Inicialmente se plantea que los equipos porten 2 tarjetas SD, ya sea para redundancia de datos o para poder guardar configuraciones en caso de que el equipo se apague o para ser configurado por primera vez.

La separación que se crea, conlleva a que la carga de los microcontroladores que posee cada equipo

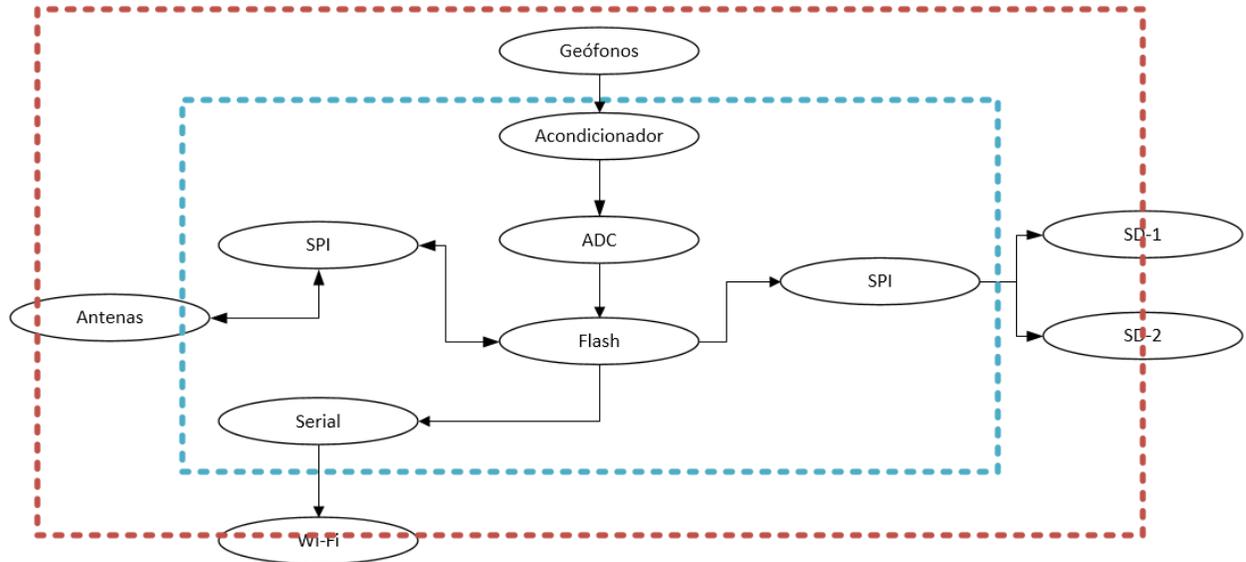


Figura 2.2: Diagrama General del Equipo de Geófonos Propuesto.

lleve una carga diferente y los procesos que se pueden cumplir en ellos pueda diferir, esto puede significar que los equipos tengan roles predeterminados al pertenecer a una red.



3. Desarrollo

3.1. Acondicionamiento Señal

Para el acondicionamiento de la señal obtenida del geófono, hay que tomar en cuenta el rango de las señales que se quiere medir, las frecuencias de interés, la frecuencia máximas de muestreo por el canal AD, las limitaciones de hardware que se tienen[20] y cumplir el criterio de Nyquist [19].

El acondicionamiento de la señal que se propone es de la siguiente forma:



Figura 3.1: Diagrama de Acondicionamiento de Señal.

Tomando en cuenta la teoría de diseño de filtro, se comienza el diseño de las 3 etapas.

- Pre-Amplificación: Se recomienda ocupar un filtro pasa altos para asegurar que la frecuencia de resonancia del geófono no genere interferencia en la señal muestreada, como además se necesita amplificar la señal de interés lo antes posible para que el ruido no se propague.

La resonancia del geófono se puede controlar mediante una resistencia 'shunt' que se recomienda en el datasheet, por lo que el filtro pasa altos se podría no implementar o de no colocar la resistencia 'shunt', se puede optar por realizar un filtro digital, una vez ya convertidos los datos.

- Filtrado: Como se definió el muestreo de la señal a una frecuencia de 200Hz, el filtro anti-aliasing se propone cercano a los 100Hz para cumplir el criterio de -3dB de la banda de paso.
- Amplificación: Como no es suficiente la amplificación de la primera etapa para alcanzar la máxima excursión de la referencia máxima del convertor análogo-digital que es de 3.3V, se tiene que optar por una segunda etapa de amplificación.

Tomando todo esto en consideración, se elige una topología de un amplificador instrumental, obtenida de [22] y [13] ya que posee una alta impedancia de entrada, cosa que no afecte la resistencia 'shunt' que tendrá el geófono.

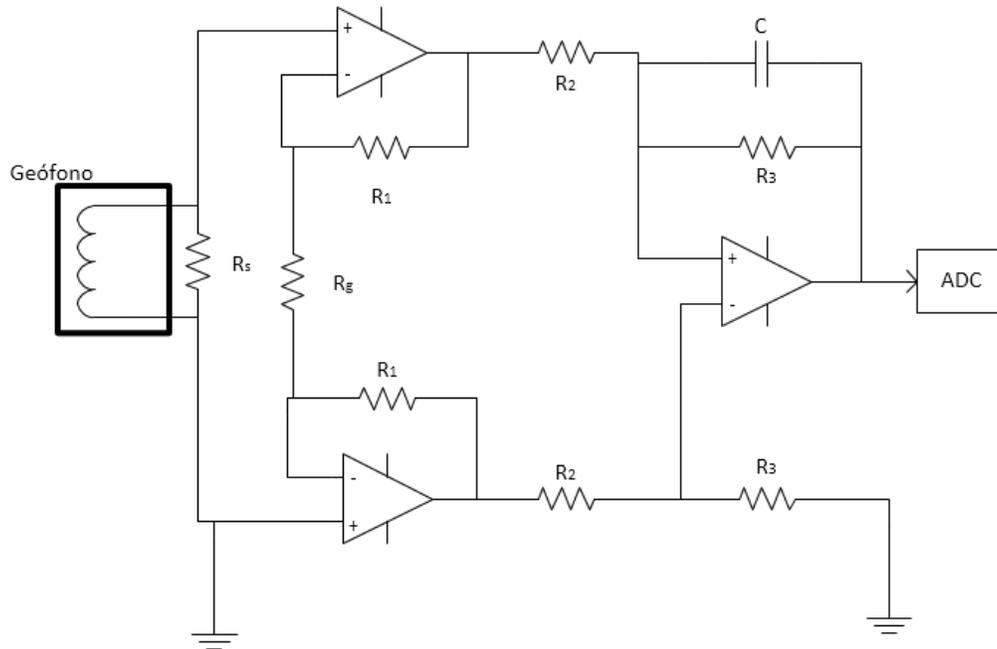


Figura 3.2: Diagrama del Circuito Propuesto.

Para este esquema se tienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{adc} = V_{geofono} \cdot \left(1 + \frac{2R_1}{R_g}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2} \quad (1)$$

$$F_{corte} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot C} \quad (2)$$

Con las Ecuaciones (1) y (2) calcula la ganancia y la frecuencia de corte deseada, ya que al amplificador instrumental a la segunda etapa se le añadió un condensador para que pueda actuar como filtro pasa bajo. Se ajustan a valores comerciales, con lo que se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Ganancia} &= \frac{V_{adc}}{V_{geofono}} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_g}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2} \\ &= \left(1 + \frac{2 \cdot 10k}{1k}\right) \cdot \frac{100k}{10k} = 210 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot F_{corte}} \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100k \cdot 100} = 15nF \end{aligned} \quad (4)$$

A continuación se presentan los resultados de la simulación del circuito, obtenido con Proteus 8.

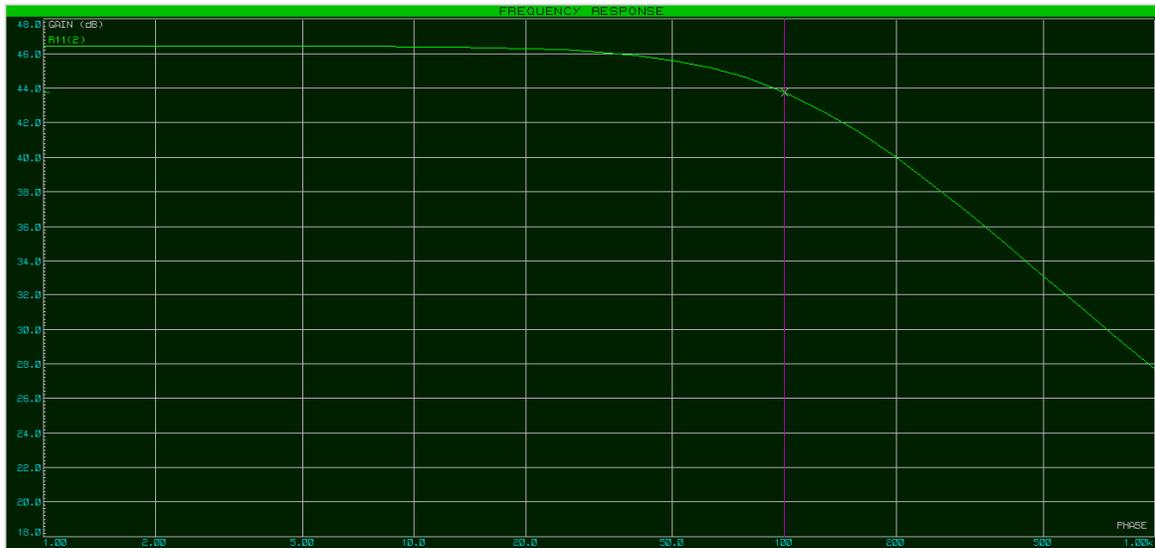


Figura 3.3: Diagrama de Bode Circuito de Acondicionamiento.

En resumen, una vez obtenidos los datos para la reconstrucción de la señal hay que aplicarle una pequeña modificación a la fórmula para obtener la velocidad, que vendría siendo la ganancia.

$$Velocidad = \frac{Bits}{Sensibilidad \cdot 1365 \cdot Ganancia} \quad (5)$$

3.2. Manejo de Sensores Análogos

Para esta etapa se implementa el periférico análogo digital (ADC) configurado con una resolución de 12 bits, que es lo máximo que permite la tarjeta de desarrollo. Los canales de conversión seleccionados no están en orden, por lo que, se aprovecho la ventaja de la conversión regular de canales que tiene la tarjeta, esto es que se asigna una lista para que convierta los canales de forma consecutiva, la desventaja es que el conversor análogo digital solo utiliza un registro para la conversión, con lo que a penas convierte hay que trasladar la información a la memoria del dispositivo.

La solución a este problema es utilizar el 'Direct Memory Access' que es una de las principales ventajas de la tarjeta (por esta característica se le considera una DSP de bajo costo). Con esto se puede almacenar de forma automática mediante hardware y una vez que la conversión está lista se puede utilizar y leer mediante software.

3.3. Utilización de Acelerómetros

Se utilizarán acelerómetros que tienen distintas formas de comunicarse con el equipo, los cuales se van contrastando y comparando para ver cuales son mejores en razón precio/calidad, comparando el ruido, máxima escala de fondo, resolución, entre otros.

Para los acelerómetros análogos hay que tener el mismo cuidado con el muestreo de los geófonos, es decir el correcto ajuste al filtro pasa bajos para asegurarse de poder reconstruir la señal original.

El acelerómetro LIS331 se comunica mediante puerto SPI y se puede definir el filtro y la frecuencia de muestreo mediante la configuración de los registros que este posee, la ventaja de este dispositivo es que posee una resolución de 16bit.

El acelerómetro y giroscopio MPU-6050 se comunica mediante el periférico I2C, el cual se puede configurar la frecuencia de muestre y que este genere interrupciones para medir dichas señales o para caídas libres, etc. La ventaja de este integrado frente a los otros es el giroscopio que es capaz de indicar la posición del equipo y calcular con exactitud las aceleraciones hacia adonde apuntan.

La conversión posterior de los datos para aceleraciones es mediante la siguiente formula:

$$Ac. = \frac{Bits}{Sensibilidad} \quad (6)$$

3.4. Tarjeta SD

Para el almacenamiento de datos se utilizará una tarjeta de memoria SD, la cual se comunicará con la tarjeta de desarrollo mediante el protocolo de comunicación SPI.

Se analizó ocupar la librería FatFS [23] que es la encargada de comunicar el protocolo SPI y ordenar todo para que quede en un formato Fat32 o Fat16 y se pueda guardar archivos en extensiones conocidas, como .txt.

Se analizó la capacidad de memoria del dispositivo, ya que esta es una importante limitante en la aplicación que se quiere dar, con lo que se obtuvo una capacidad de guardar 0.7 días utilizando la librería FatFS y si se guarda en formato 'RAW' se logra almacenar alrededor de 15 días. Otra limitante es la cantidad de los ciclos de reloj que se gastan para guardar la información y en el formato FatFS no es posible tener un número exacto al escribir datos en archivos .txt, en cambio si el almacenamiento se hace en 'RAW' el número de ciclos se mantiene y es posible crear un cierto orden en la codificación.

En resumen se accederá a la tarjeta en formato 'RAW', es decir se escribirá byte a byte en la tarjeta y no tendrá formato para ser leído mediante el explorador de archivos.

Una de las desventajas de este método que en el sistema operativo Windows pide dar formato a la tarjeta ya que no la puede acceder de forma nativa y si el usuario no tiene cuidado se puede perder la información y la otra desventaja es que para poder acceder a la información se requerirá de un software adicional que se encargue de manejar los datos y transformarlo en un formato más universal.

A continuación se muestra un ejemplo de como muestra la información el computador.

```
Offset(h) 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C
00000000 00 FF 01 54 00 15 00 20 00 03 00 01 FF
00000200 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 FF
```

Figura 3.4: Data 'RAW'.

3.5. Control de acceso al medio

Los protocolos de control de acceso al medio (MAC) define las reglas para ocupar y controlar el medio, es decir, juega un rol principal para obtener un eficiente uso del medio. Usualmente en las WSN la debilidad es la escasez de energía y es el módulo RF es el que posee mayor consumo energético, por lo que la mejor forma de ahorrar energía es utilizando protocolos para disminuir las interferencias.

Los objetivos principales de que requiere una MAC de WSN son:

- Evitar Colisiones, como todas los protocolos MAC.
- Aumentar la eficiencia energética, dado que la transferencia de datos consume la mayor parte de la energía.
- Escalabilidad y adaptabilidad, ya que se pueden agregar nuevos nodos o disminuir el número de estos.

Los protocolos más utilizados en las WSN son clasificados en 3 grupos: programado, no-programado o híbridos. Los más conocidos se explicarán a continuación:

TDMA es un ejemplo de la categoría de los programados, lo que hace este protocolo es dividir el tiempo de un canal en N espacios y en cada espacio solo un nodo esta autorizado a enviar datos, esto se repite ciclicamente.

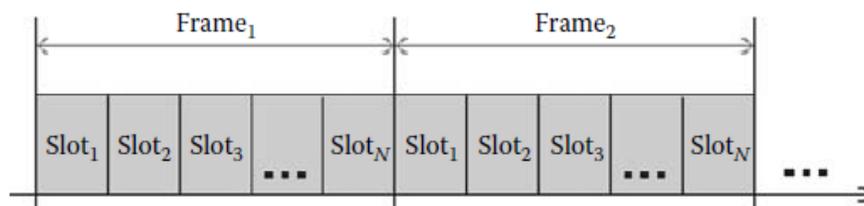


Figura 3.5: Diagrama TDMA.

Las principales desventajas son: no puede coordinar un gran numero de sensores y que la funcionalidad de sincronía debe existir para corregir errores causados por cambios inesperados de los relojes.

El TDMA requiere que los nodos formen clusters (grupos), esto quiere decir que los nodos tienen que asumir distintos roles, a su vez creando posibles problemas de dejar nuevos sensores fuera de los grupos.

El FDMA es otro esquema que al igual que el protocolo anterior intenta solventar las colisiones no teniéndolas, pero lo hace a través de cambios de canal, se cree que el cambio de canal puede aumentar el precio de las antenas pero hoy en día la diferencia de precio con este tipo de antenas son solo centavos.

El CSMA, que es de la categoría de los no-programados, consiste en escuchar el medio, si este está ocupado se sigue escuchando hasta que no lo esté, el problema es que más de un nodo puede estar esperando lo mismo, lo que genera una colisión, también existe una variación que en vez de seguir escuchando se espera un tiempo aleatorio y se transmite en ese tiempo.

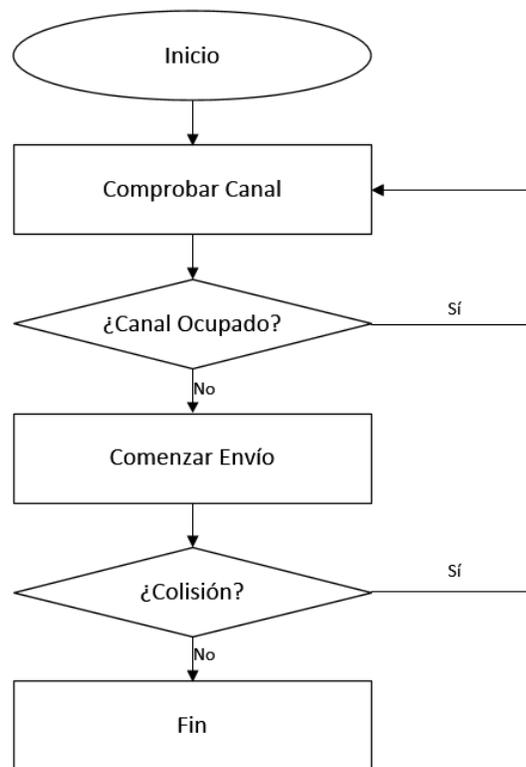


Figura 3.6: Diagrama CSMA.

Las principales ventajas son la simpleza, flexibilidad y la robustez. No requiere sincronía, por lo que no genera problemas con nuevos nodos o nodos que dejan la red. La principal desventaja es que aún existen colisiones y esto genera grandes pérdidas de energía.

Una de las mejoras a este protocolo es instaurar un dispositivo receptor con múltiples antenas a distintos canales cada una, con lo cual no existe colisión entre datos y para ahorrar un poco de la energía se apagan los módulos que no están recibiendo ni transmitiendo.

Finalmente para los protocolos híbridos donde se intenta aumentar las fortalezas de los protocolos uniéndolos con otros, por ejemplo el WiseMac que es una mezcla entre el CSMA y el TDMA que consiste en ocupar dos canales comunicación, el canal de los datos es accesado por TDMA y el canal de control es accesado por CSMA.

Para el prototipo a realizar no existe ningún problema en que los nodos formen clusters, los nodos tienen como necesidad estar sincronizados por lo que esto no agrega ninguna dificultad extra a lo planteado.

Se plantea utilizar una mezcla de los protocolos mencionados anteriormente, ya que el protocolo TDMA y FDMA tienen que ser sincronizados inicialmente por un programador, lo que se espera es que el equipo se auto-configure, por lo que parte con un protocolo CSMA y este coordinará los otros protocolos para evitar todo tipo de colisiones que puedan ocurrir.



3.6. Distribución carga (o tiempo) del Microcontrolador

Se realiza un análisis a la carga que se lleva el microcontrolador, ya que este no posee doble núcleo y la única forma de paralelizar las tareas es a través del DMA que posee, que solo se encarga de 2 periféricos al mismo tiempo y son solo funciones limitadas.

El código es secuencial, cuando comienza inicializa los periféricos y luego entra a realizar las tareas cíclicas de cada periodo, el periodo de una frecuencia de 200Hz es de 5ms.

Para el dispositivo que solo posee los periféricos digitales el análisis es el siguiente:

El sensor MPU6050 se demora en obtener los 6 datos $400\mu s$, al igual que el sensor LIS331 se demora la misma cantidad de tiempo en obtener solamente 3 datos, con esto ya tenemos completado el 16 % del tiempo en funciones que no se pueden optimizar.

La escritura en la tarjeta SD se demora 20 % del tiempo, este tiempo es fijo ya que se está guardando en formato RAW la información, pero este proceso solo se ejecuta una vez cada 125ms, es decir cada 25 ciclos. Para el proceso de Lectura es el mismo tiempo, pero como este proceso no se ocupa frecuentemente no se considera como carga para el dispositivo.

En enviar un dato mediante RF se demora aproximadamente 1ms, en leer el dato recibido, pueden surgir distintas perturbaciones en el medio que pueden significar una demora en la transmisión o que no se complete en el tiempo deseado, por lo que el tiempo recepción se considerará variable, siendo el mínimo tiempo en recibir los datos dentro del siguiente mili-segundo.

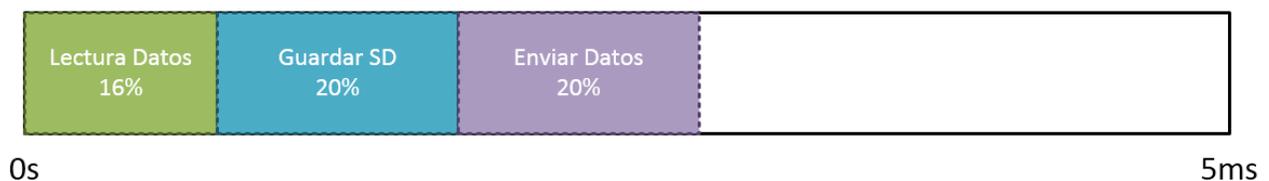


Figura 3.7: Tiempo de carga dispositivo digital.

Con este estudio de la carga del microcontrolador se pueden hacer cálculos experimentales de la cantidad máxima de datos que puede enviar por ciclo, para así poder transmitir estos datos hacia otros dispositivos.

En Primer lugar se considera el peor de los casos es que todas la redes sean nodos de acelerómetros al igual que el maestro, esto quiere decir que tienen que tener el tiempo de lectura activo y que generan 9 datos de 2 bytes (16-bit), en segundo lugar hay que tener la consideración del máximo de bytes que

puede enviar el modulo RF, que es de 32 bytes, con esto se tiene que:

$$Ciclos\ por\ envio = \frac{32}{9 \cdot 2} = 1,7 \quad (7)$$

Que corresponde a los ciclos de muestreo que se pueden enviar, si aprovechamos el tiempo muerto que tiene el procesador sin hacer ningún cálculo se pueden enviar 3 veces datos sin ninguna dificultad, lo que se traduce en:

$$Ciclos\ por\ cada\ 3\ envios = \frac{32 \cdot 3}{9 \cdot 2} = 5,3 \quad (8)$$

Esto quiere decir que solo es necesario que la antena trabaje 1 vez cada 5 ciclos enviando la información, sin contar las pérdidas asociadas, pero como solo es necesario guardar los datos cada 25 ciclos se puede hacer que estos eventos ocurran de forma desfazada, así se puede dejar el tiempo sobrante para algún cálculo, retransmisión o para el tiempo que se demora en transmitir el dato ya que este proceso no es automático.



3.7. Alimentación y batería de respaldo

El equipo necesita una alimentación entre 3.3V y 2.9V para que todos los periféricos funcionen sin ningún problema, se opta por alimentar los dispositivos con 5V aprovechando la gran facilidad de obtención de los transformadores cargadores de USB.

Para esto se propone el esquema de la Figura 3.8, para lograr las 3 funcionalidades principales del equipo, que funcione con corriente alterna, que funcione con batería y que pueda hacer un sistema de respaldo sin que el equipo tenga que apagarse.

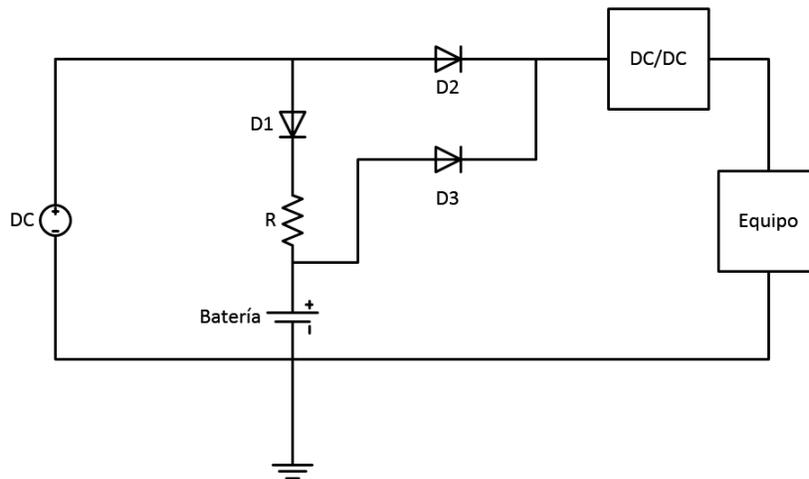


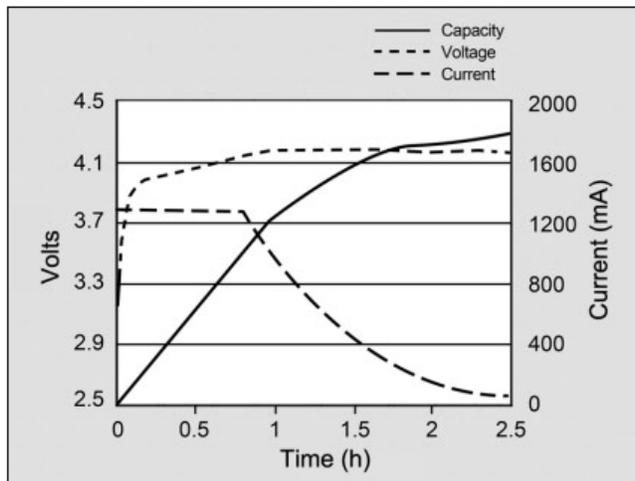
Figura 3.8: Esquema propuesto para circuito de respaldo.

Primero hay que tener en cuenta las características de la batería elegida, para poder crear un circuito que cargue la batería. Ver Figuras 3.9a y 3.9b.

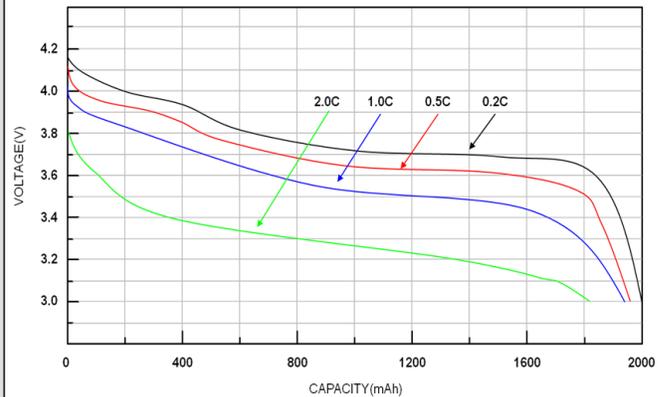
A pesar de lo recomendado para las baterías de litio que tienen una gran corriente de carga de los cargadores convencionales no se les puede exigir tanta corriente y como a su vez se alimenta el equipo no se le puede exigir cumplir con estas curvas de cargas rápidas, por lo que, se realiza una linealización que se hacen en los cargadores normales de baterías de celulares, que ocupan las mismas baterías.

En esta linealización se intenta obtener lo mismo que la curva de descarga pero hacia una curva de carga, para esto hay que tener en cuenta las potencias máximas que aguantan cada componente y sus voltajes de operación, dicho esto se proceden con los cálculos para el circuito de carga de la batería (ver Figura 3.10a).

El diodo (D1) que se ocupa es de la familia 1N400X, el cual tiene un voltaje de conducción típico



(a) Curvas de carga.

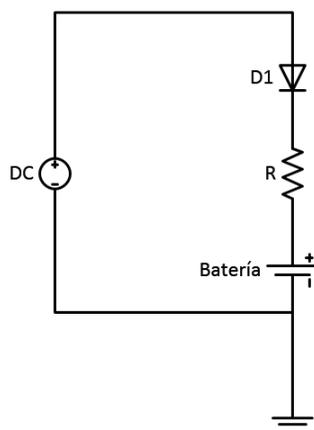


(b) Curvas descarga.

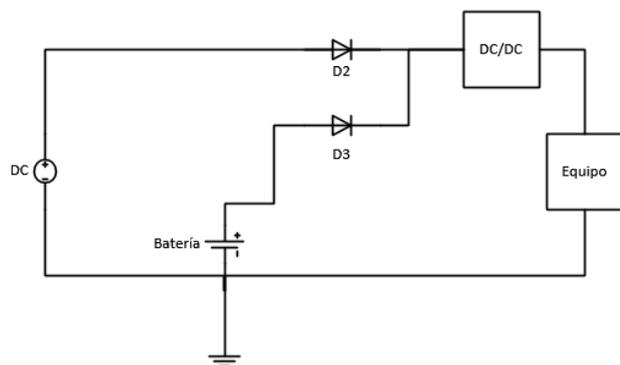
Figura 3.9: Curvas características de baterías de Litio

de 0.6V, y siguiendo la curva de voltaje de la batería que va desde los 3V hasta los 4.2V cuando esta está descargada y cargada respectivamente. Las resistencias que se ocupan son de $\frac{1}{4}$ W por lo que esta sera una limitante.

Aplicando la Ley de Kirchoff se obtiene que el voltaje que cae en la resistencia va entre los 1.4V y los 0.2V. Aplicando la limitante de la potencia máxima dicipada en la resistencia, se obtiene un valor de 178mA para la corriente que pasa cuando está descargada la batería, lo que se obtiene con una resistencia de 7.8Ω , acercando esto a un valor comercial existente de resistencia, R1 sería de 10Ω .



(a) Circuito de carga.



(b) Circuito de Alimentación Dual.

Figura 3.10: Subcircuitos.

En segundo lugar se necesita alimentar el circuito con energía directamente de la red y directamen-

te de la batería cada uno de forma separada para esto es solo llevar la energía al convertidor DC/DC (ver Figura 3.10b), para que ambas fuentes de energía puedan coexistir sin crear conflictos entre si es necesario colocar los diodos D2 y D3 que también pertenecen a la familia de los 1N400X como se muestra en la siguiente imagen.

Luego se puede ver que ambos circuitos pueden coexistir y se realiza la simple union de estos y se llega al esquema propuesto en la Figura 3.8.

Finalmente el circuito DC/DC consta de un circuito integrado LM317 que es un regulador lineal de voltaje, cuya caída de voltaje mínima con respecto a la entrada es de 1.25, lo cual presenta una gran ventaja frente a los LM78XX pero aun así se puede encontrar otro equivalente que tenga menor voltaje de caída (Dropout Voltage).



4. Resultados

4.1. Introducción

Para presentar los resultados, se muestra versión a versión cada equipo o mejora desarrollada, ya que cada versión se va probando en terreno o en laboratorio, además como es un prototipo que será utilizado por un usuario ajeno a la construcción o programación de este, hay que tomar en consideración las propuestas por el usuario.

Los principales resultados son presentados en el Anexo A, ya que la parte fundamental del prototipo está en la programación.

4.2. Resultados V.1

La versión 1 consta en utilizar solamente sensores analógicos, los geófonos en la etapa de acondicionamiento poseen el filtro pasa bajos sintonizado a 100Hz y el acelerómetro (ADXL335) posee un filtro pasabajos semi-integrado que es regulado mediante los condensadores que se pueden cambiar.

En esta versión se aprovecha la configuración predeterminada que se le puede aplicar a cada antena Xbee y luego solo se le comunica mediante puerto serial.

A continuación se explica mediante un diagrama el funcionamiento de lo realizado.

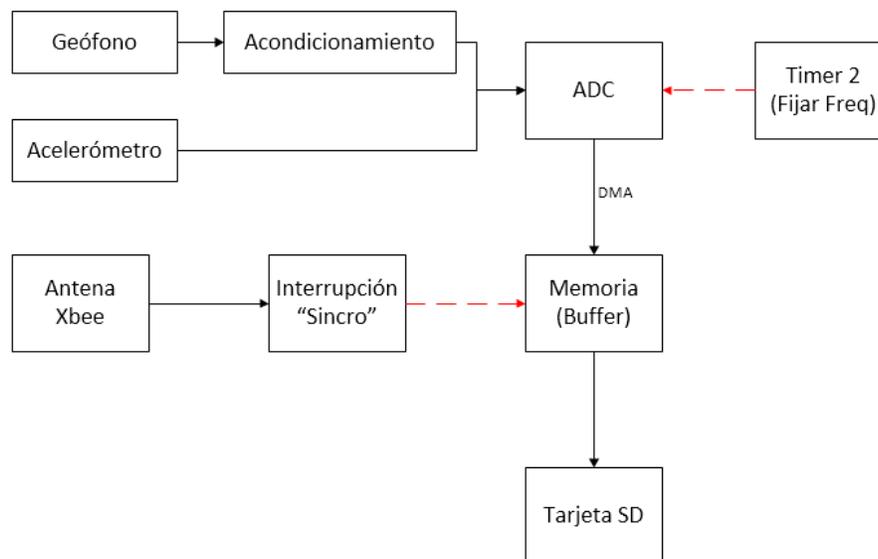


Figura 4.1: Diagrama de Funcionamiento de Prototipo V1.

Este diagrama de Funcionamiento general, ejemplifica como van los datos direccionados, muestra que el Timer 2 es el encargado de fijar la frecuencia de muestreo y el rol del equipo viene dado por el rol que se le programa a la antena Xbee, ya sea este como 'End Device' o 'Router Device' o 'Coordinator'

A su vez se diseña un equipo solo con acelerómetros para poder hacer pruebas de sincronía mediante un equipo con menor tiempo en manejo de datos y tener un rol distinto que el dispositivo con ambos sensores.

A continuación se presentan los circuitos impresos de cada dispositivo.

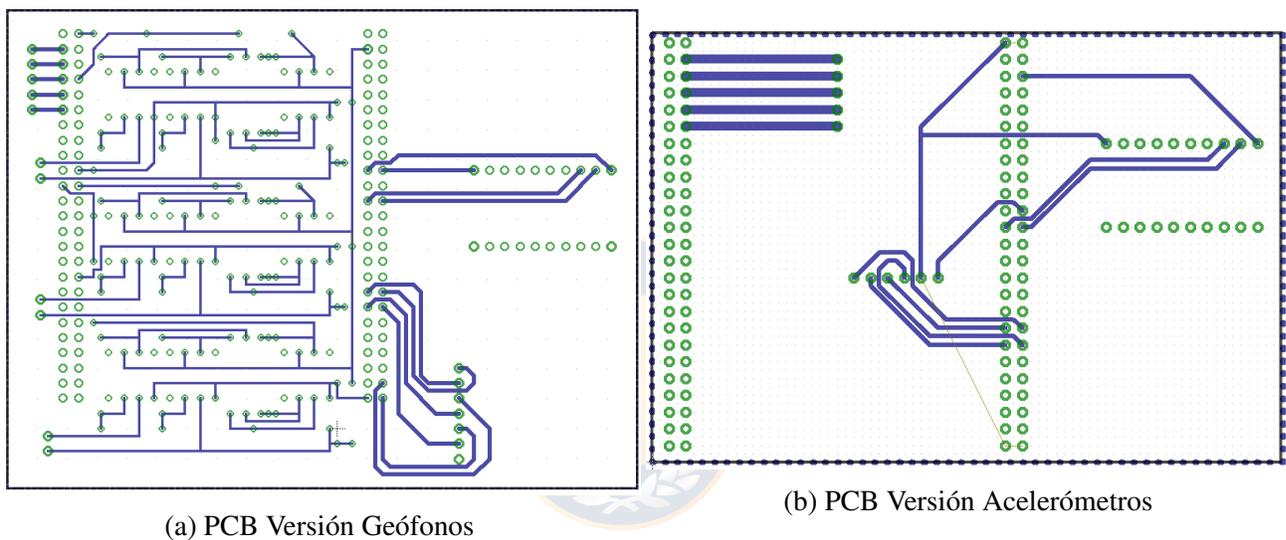
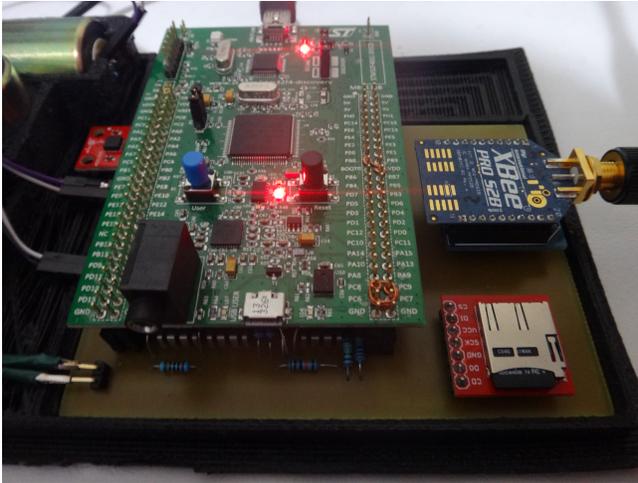


Figura 4.2: Circuitos Impresos V.1.

En esta versión, ambos dispositivos son funcionales, pero no en las condiciones óptimas que se esperaba, ya que el sistema de acondicionamiento con los geófonos no funcionaba bien por los integrados LM741 que no eran de gran eficiencia y el voltaje de caída con respecto a la alimentación es demasiado grande dejando que el geófono perdiera gran parte de su resolución. Por lo mejor de esta versión fue el avance en codificación y el correcto funcionamiento del acelerómetro, tarjeta SD y antena Xbee.

Para obtener los datos se utilizó un programa hecho en C, que su objetivo principal era obtener los datos y traspasarlos a un archivo .txt. El programa de Visualización también se realizó en C++ con la librería Qt4, el que se muestra a continuación con unas señales de prueba para distinguir los canales por separado, para 6 canales.

La Desventaja de estos programas es que se encuentran separados, los que enredan mucho y quizás



(a) Versión Geófonos



(b) Versión Acelerómetros

Figura 4.3: Prototipos V.1.

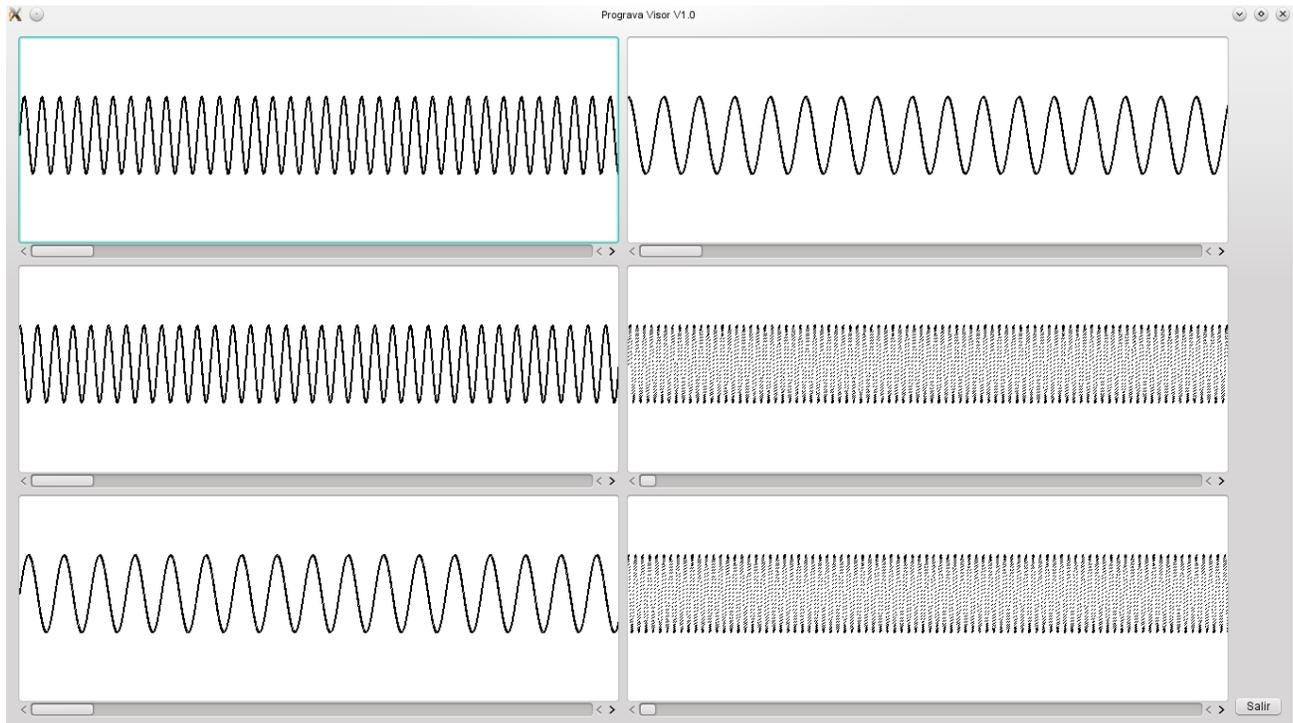


Figura 4.4: Programa de Visualización.

no se aprecie como producto final. Por lo que para la siguiente versión se plantea unirlos o comenzar desde cero pero con 1 solo programa para ambas funciones.

4.3. Resultados V.2

Para la Versión 2, se requiere arreglar el problema del circuito acondicionador, que era generado por el componente LM741, que se sustituye por el MCP6024, que en sus características está el bajo consumo de energía y que es 'Rail-to-Rail' que quiere decir que la pérdida de voltaje de la salida con respecto a la alimentación es muy baja.

Para solucionar esto se procede con un nuevo diseño de PCB pero esta vez se prueban independientemente cada geófono para realizar pruebas alimentando todo con 2 pilas AA.

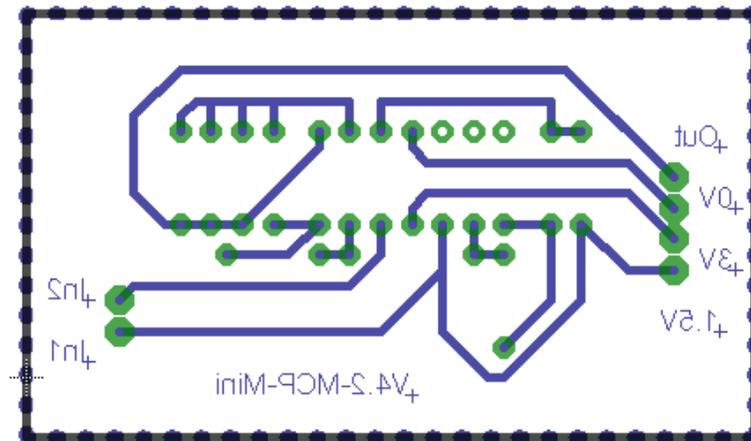


Figura 4.5: V4Mini.

Para esta versión también se modificó la interfaz gráfica del programa y el programa que adquiere los datos y se unió estos programas para que no fuera tan engorroso el funcionamiento, esto se realizó en Python, pero surgieron nuevos problemas que no ocurrían antes, como por ejemplo Python no reconoce todos los datos y al verificar los datos existe corrimiento de los datos frente a algunos caracteres hexadecimales, por lo que se tendrá que hacer todo en C++ o en C donde este error no ocurría.

4.4. Resultados V.3

La versión 3 consta de los nodos energizados con pilas AA o mediante micro-usb, estos módulos no tienen un módulo de radiofrecuencia ni tampoco internet, el objetivo de crear estos dispositivos era probar la versión pequeña de la tarjeta de desarrollo (que tiene un microcontrolador más barato), la cual solo presentó una anomalía con el periférico asociado a la comunicación I2C, estos equipos tienen bajo consumo y también fueron creados con la finalidad de realizar las pruebas a los sensores de manera cómoda. En esta etapa se plantea un diseño para la caja de los geófonos ya que necesitan estar orientados en las posiciones donde se desea medir (uno en cada eje).



Figura 4.6: Nodo Geófonos con caja

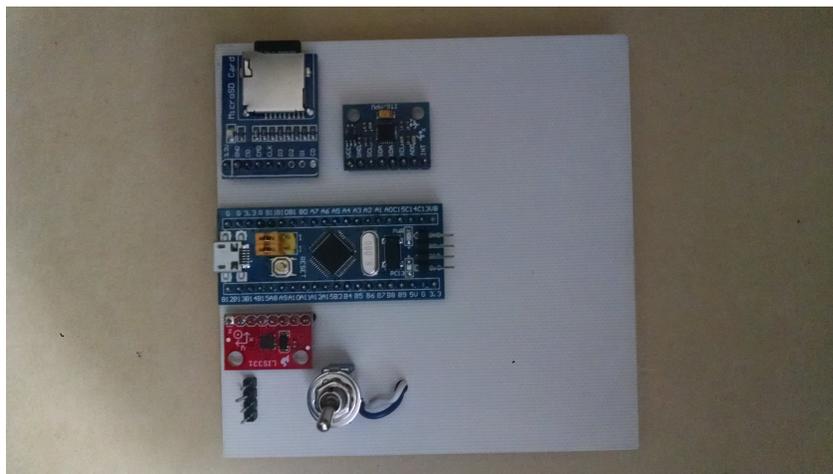


Figura 4.7: Nodo con Acelerómetros

Los equipos cuentan con una interfaz gráfica que muestra lo que el sensor guarda en la tarjeta

SD, hacia el computador, mediante comunicación serial. A continuación se muestran las interfaces diseñadas en python.

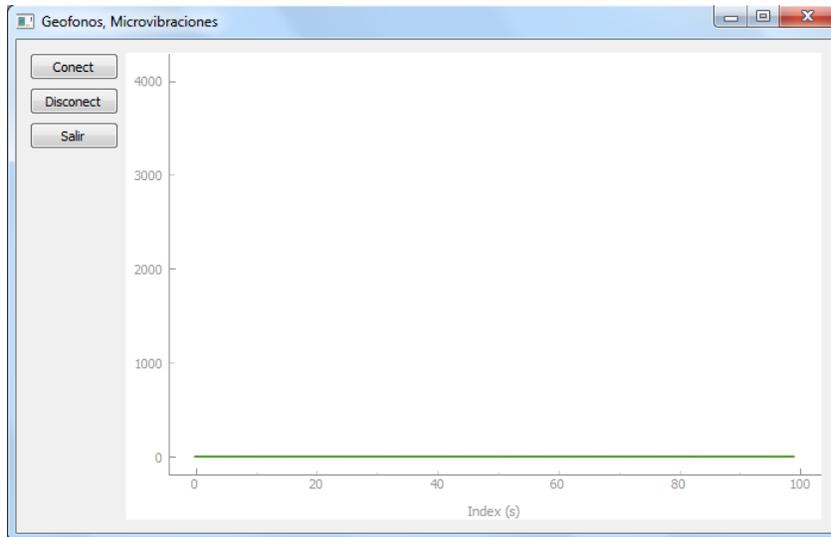


Figura 4.8: Interfaz Nodo Geófonos

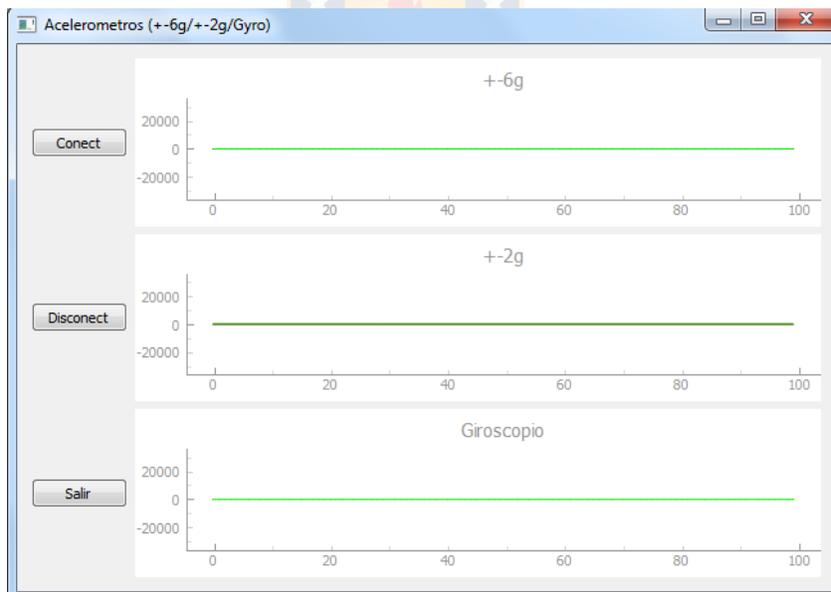


Figura 4.9: Interfaz Nodo Acelerómetros

A pesar del buen funcionamiento de estos equipos la falta de algunos periféricos son muy notorias ya que en caso de implementar nuevos sensores o módulos. Este trabajo deja en evidencia que para el correcto funcionamiento de las partes aun se puede reducir mucho los tamaños que se tienen.

4.5. Resultados V.4

En la versión 4 se vuelve al uso de las tarjetas de desarrollo STM32F4, ya que tiene mayor números de periféricos y no ocurre el error con la comunicación I2C.

En esta versión (ver Figura 4.10) contiene todos los módulos que se plantean al comienzo, aunque solo las pruebas de desempeño darán a conocer realmente la utilidad que así sea o si es necesario remover algún módulo que no sea necesario.

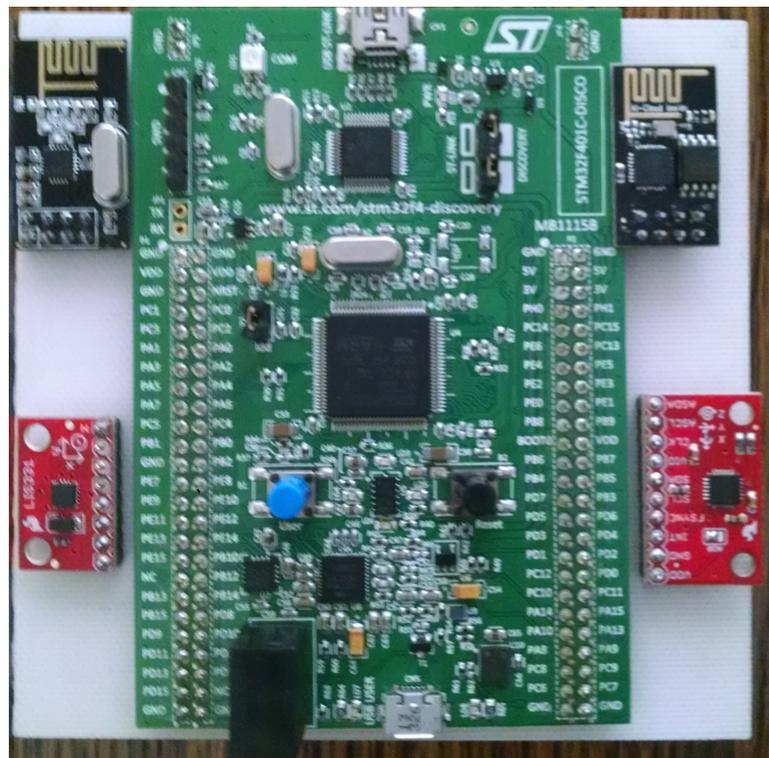


Figura 4.10: Nodo Versión 4 acelerómetros, STM32F4.

En la versión 4 se mezclan los nodos con ambos microcontroladores, ya que se sigue comparando el desempeño de ambos microcontroladores.

En la versión del microcontrolador STM32F1 (ver Figura 4.11), no se incluye el módulo Wi-Fi, ya que el formato del módulo adquirido no logra los rendimientos esperados, aunque si se puede utilizar como identificador del nodo o para crear una página web para ver cuales nodos están en línea.

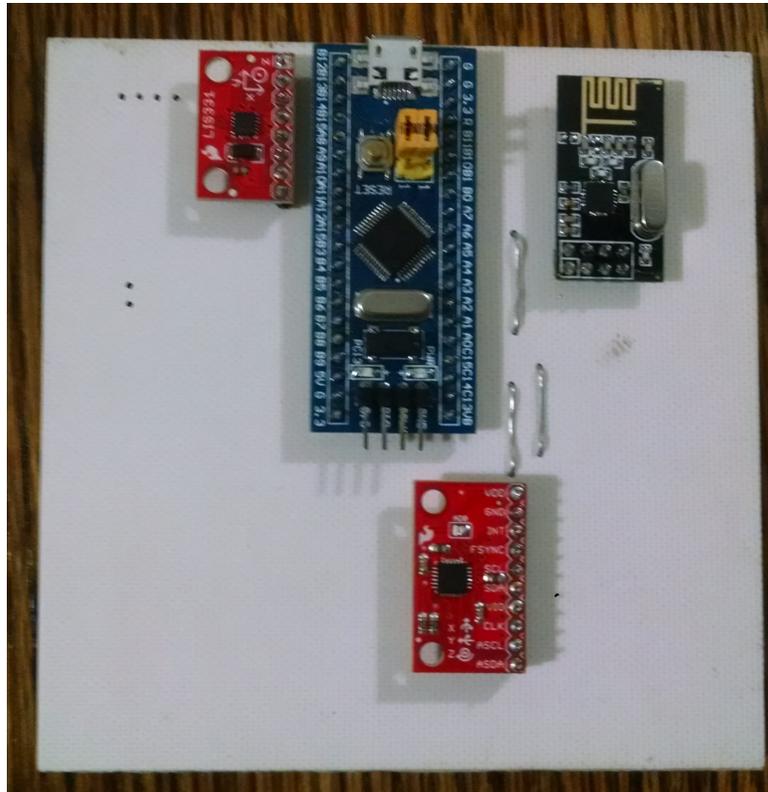


Figura 4.11: Nodo Versión 4 acelerómetros, STM32F1.

4.6. Funcionamiento de equipos

Primero hay que tener en cuenta que cada equipo al momento de cargarle el código, se le asigna una serie de parámetros, los más importantes son: que tipo de sensores posee, un código de identificación único y si el nodo es o no una cabeza de nodo (o cabeza de grupo). En la Figura 4.12 se explica el funcionamiento de los nodos.

La función de maestro consta de la función de sensado normal y de reunir la información de los nodos esclavos y guardar la información en conjunto , a continuación se explica el funcionamiento normal, luego de la inicialización.

Según el cálculo de tiempos realizados la máxima carga que puede aguantar el equipo maestro es de 4 esclavos más los datos que el mismo pueda recolectar, estos son los 5 tipos de ciclos básicos que se tienen para poder manejar la comunicación de los nodos tratando de evitar todo tipo de colisión en el funcionamiento normal.

A continuación se presenta el diagrama del dispositivo esclavo asumiendo que en la primera etapa se le asignó el canal numero 1.

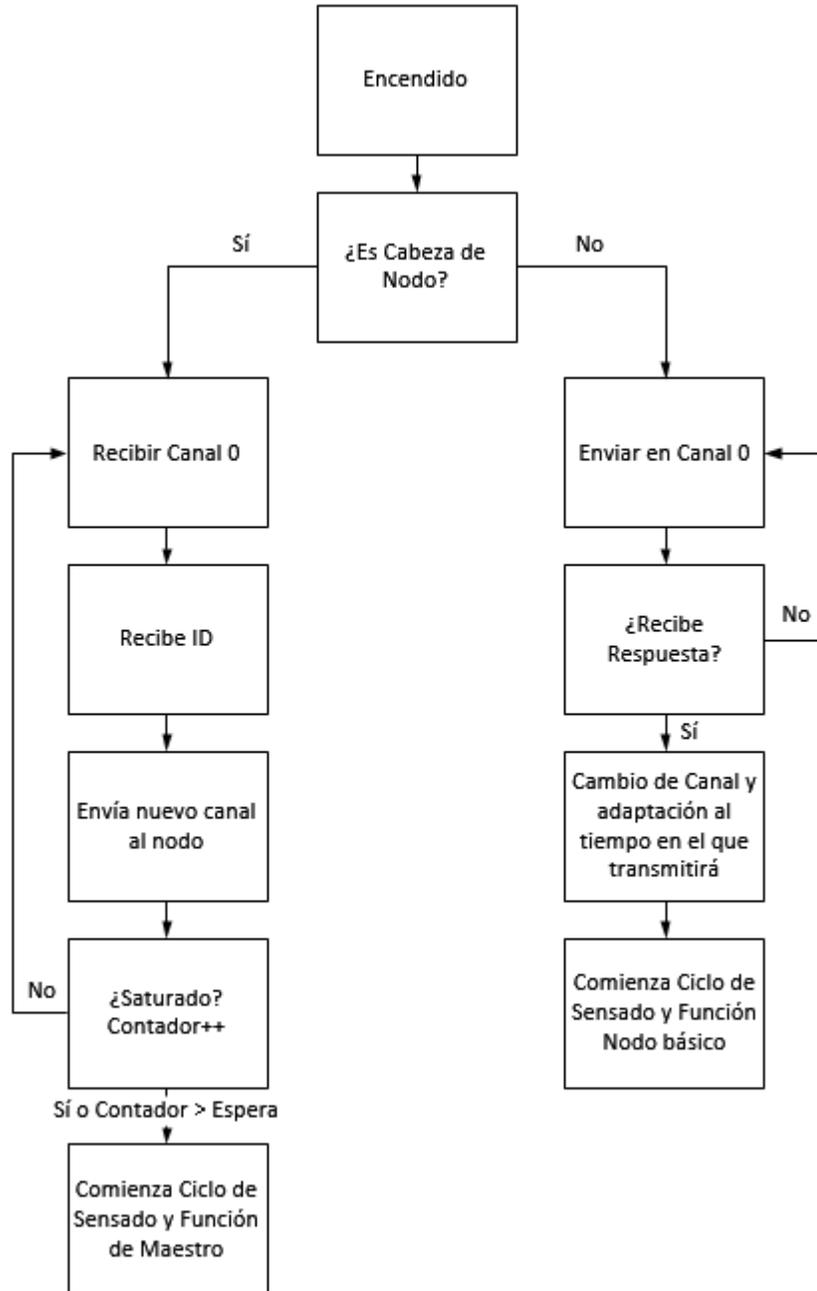


Figura 4.12: Diagrama de Funcionamiento Inicial de los nodos

En resumen el funcionamiento se pueden identificar 2 etapas, la primera en donde los dispositivos comienzan a reconocer sus funciones y se designan los canales con mayor efectividad, luego en la segunda etapa se comienza con un modo donde se guardan los datos, se envían y reciben para almacenar una copia en el dispositivo maestro.

Los protocolos que utiliza este método se basan en el CSMA, en la primera etapa, el FDMA, en



Figura 4.13: Ciclos básicos Dispositivo Maestro

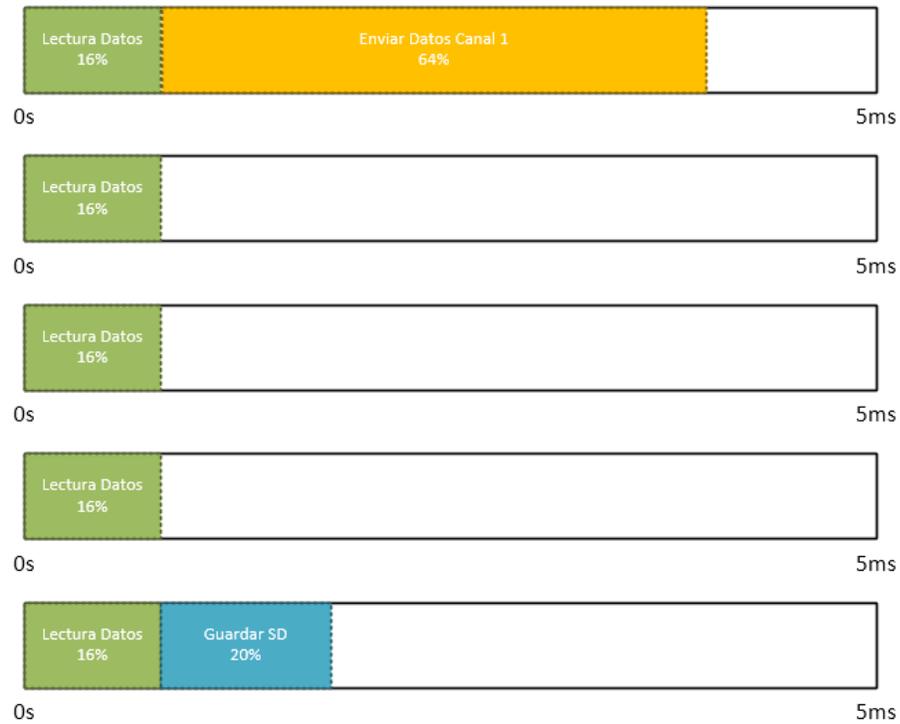


Figura 4.14: Ciclos básicos Dispositivo Esclavo

el cual cada equipo transmite en un canal determinado y también se utiliza la TDMA en la cual se divide el tiempo en el cual puede y no puede recibir datos el equipo por la obtención de sus datos o la obtención de datos de dispositivos esclavos.

El principal problema es el "corrimiento de reloj" o clock drift, el cual consiste en que al fijar parámetros de reloj iguales y siendo estos de la misma línea de producción estos son muy sensibles a los componente y a la temperatura, por lo que no se tendrá una forma de asegurar el correcto funcionamiento de lo antes planteado, es por eso que es necesario abordar el problema de la sincronización de forma periódica.

Existen 3 formas comunes de abordar este problema:

- Añadir un GPS, el cual cada equipo tendría que tener uno pero el aumento de precio y de consumo de energía muy grande comparado al resto del sistema.
- Utilizar algoritmos de sincronización continua, lo que requiere cada X periodos de reloj ir ajustando el tiempo de sincronía.
- Utilizar un sistema de despertar y dormir, en el cual las antenas se despiertan en ciertos tiempos para transmitir toda la información pendiente luego estas duermen, este método es que posee mejor ahorro energético.

Para esta versión se utiliza el método intermedio y se asume que el equipo maestro es el que tiene el tiempo correcto y los dispositivos esclavos se ajustan a este, esto deja en libertad de modificar para una versión posterior el reloj del equipo maestro por uno de mayor calidad o añadir un GPS solo al dispositivo maestro.

4.7. Precios

A continuación se tabula la lista de precios de las partes utilizadas hasta ahora:

Producto	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Tarjeta de desarrollo	1	15.83	15.83
MPU6050	1	39.95	39.95
LIS331	1	27.95	27.95
nRF24	1	19.95	19.95
micro-SD slot	2	1.88	3.76
ESP8266	1	15.95	15.95
PCB 10cm x 10cm	1	9	9
Total	-	-	136.39

Tabla 4.1: Precios Placa Acelerómetros Fabricada.

Producto	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Tarjeta de desarrollo	1	15.83	15.83
MCP6024	3	1.91	5.73
SM-24 (Geófono)	3	59.95	179.85
Condensadores y Resistencias	1	5	5
nRF24	1	19.95	19.95
micro-SD slot	2	1.88	3.76
ESP8266	1	15.95	15.95
PCB 10cm x 10cm	1	9	9
Total	-	-	255.07

Tabla 4.2: Precios Placa Geófonos Fabricada.

Aún hay que agregar los costos de fabricación del cofre o caja para proteger la electrónica del dispositivo. Esto aún puede simplificarse, dejando de lado los circuitos pre-fabricados, con lo que se puede reducir el tamaño y coste del circuito, por lo que los precios pueden llegar a ser los siguientes:

Producto	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Microcontrolador	1	7.0	7.0
MPU6050	1	5.0	5.0
LIS331	1	4.0	4.0
nRF24	1	2.3	2.3
micro-SD slot	2	1.88	3.76
ESP8266	1	6.95	6.95
Resistencias y Condensadores SMD	1	5.0	5.0
PCB 5cm x 5cm	1	4	4
Total	-	-	38.01

Tabla 4.3: Precio Placa Acelerómetros simplificada.

Producto	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Microcontrolador	1	7.0	7.0
MCP6024	3	1.91	5.73
SM-24 (Geófono)	3	59.95	179.85
Condensadores y Resistencias	1	5	5
nRF24	1	2.3	2.3
micro-SD slot	2	1.88	3.76
ESP8266	1	6.95	6.95
PCB 5cm x 5cm	1	4	4
Total	-	-	214.59

Tabla 4.4: Precios Placa Geófonos Simplificada.

Al igual que el caso anterior hay que agregar los costes de fabricar el cofre o caja, pero esta tendrá un menor costo ya que el espacio que se requiere es mucho menor.

5. Pruebas

5.1. Prueba de sensores

Como se ha mencionado anteriormente, las frecuencias de interés de los equipos son menores a 100Hz por lo que todos los filtros se fijan debajo de los 100Hz, se realizaron pruebas mediante una plataforma excitada con parlantes, a 50Hz, utilizando el equipo con geófonos y los acelerómetros, en esta prueba se descartó el sensor LIS331, ya que posee mayor rango a una misma cantidad de bits, lo que conlleva a una peor resolución.

En la Figura 5.1 se presentan los análisis de FFT de las vibraciones obtenidas con el sensor MicroStrain ($\pm 2g$) y el sensor MPU-6050 configurado a $\pm 2g$.

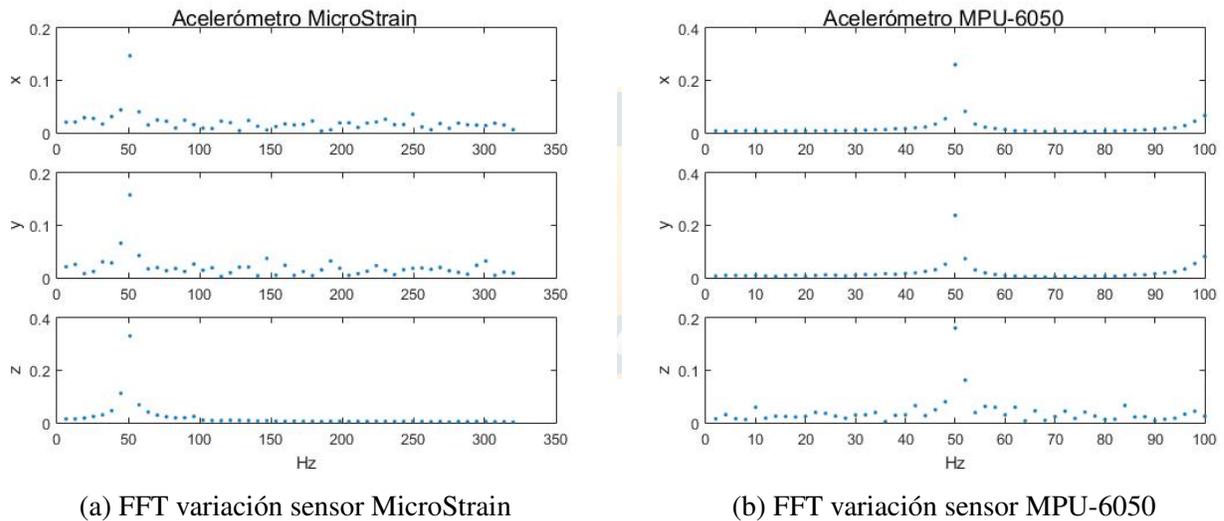


Figura 5.1: Análisis Señales

Se realiza la misma prueba para el Nodo que posee geófonos y se obtiene un resultado (Ver Figura 5.2) similar al obtenido por el acelerómetro MPU6050, obteniendo así con este análisis la misma información.

5.2. Prueba de demora en sincronización

El equipo maestro debe de ser capaz de sincronizar a los equipos esclavos para que cumplan con el tiempo estimado y que estos sean los mínimos, cosa que se optimizó al máximo por programación del software.

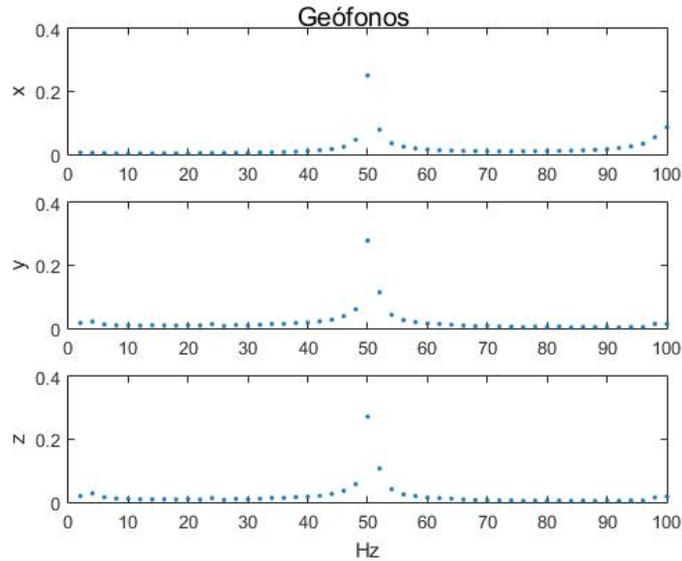


Figura 5.2: FFT señal Geófonos

Entonces la prueba realizada es la siguiente, se fija el timer del equipo maestro, luego al enviar el canal al nodo esclavo se adjunta la información con la cual se fija el reloj del sistema esclavo, la diferencia de los timers es el tiempo que se demora en sincronizar el equipo.

El equipo esclavo tiene un retraso de aproximadamente 1,5ms desde que el equipo maestro comienza enviando el mensaje, lo cual puede ser ajustado mediante software para que este tiempo sea el mínimo posible.

5.3. Prueba de fallas

Para esta sección se probará como el sistema reacciona en caso de fallas, existen varias formas de abordar los problemas en caso de fallo, a continuación se explica la forma que se abordan los problemas y como es que se prueba esta funcionalidad en el equipo.

5.3.1. Falla Nodo Esclavo

En caso de que falle un equipo que tenga la función de esclavo, si este está en la primera parte del código, es decir en la etapa de sincronización no se le asignará una canal ni tiempo para enviar los datos y si este llega a ser arreglado y quedan canales disponibles a un maestro cercano este lo asignará.

En caso de que falle una vez que comience el muestreo de las señales, el equipo maestro esperará

un tiempo que se puede fijar a voluntad para esperar que el equipo se reanude, en caso de que el equipo sobrepase ese tiempo el equipo mantendrá el canal como ocupado en caso de que el equipo esclavo se vuelva a encender.

La forma de probar esto es apagando el equipo esclavo y analizar el comportamiento del equipo maestro, analizando la información que este guarda en la tarjeta SD para detectar cuando el equipo deje de funcionar y que retorne a la normalidad cuando el nodo esclavo reaparezca.

5.3.2. Falla Nodo Maestro

En caso de fallo del nodo maestro los equipos asignados como nodos esclavos seguirán almacenando datos por si solos, se mantendrán en el canal asignado y esperarán en caso de que el nodo maestro vuelva. Se puede programar en caso de que no detecten ningún equipo maestro que esta búsqueda se vuelva intermitente o cese al cabo de un periodo, si esto sucede en el momento de iniciar el equipo maestro, los dispositivos esclavos no formarán ninguna topología y actuarán como equipos por si solos, también se puede implementar una búsqueda de equipos intermitente para ahorrar batería.

El modo de probar el funcionamiento en caso de falla del nodo maestro es la misma que en el nodo esclavo, apagando este y analizando los datos de la tarjeta SD.

5.4. Prueba de Distancia

Se realizaron pruebas de distancias para observar la capacidad máxima de los equipos, esto queda determinado por la potencia y el tamaño de las antenas, según las pruebas realizadas, estas son capaces de comunicarse en 80 metros en línea de visión y 20 metros entre paredes de cemento, mientras más paredes atraviese la señal, mayor será la pérdida en distancia que se tendrá.

5.5. Prueba del sistema de comunicación

El número máximo de nodos está determinado por los cálculos realizados anteriormente, es decir, un máximo de 4 nodos esclavos por uno maestro, esto es asegurando en el mejor de los casos que ningún tipo de información se pierda.

Para comprobar esta funcionalidad se programaron los equipos para que manden señales de prueba para poder identificar cada uno, donde cada uno envía la señal al equipo maestro el cual guarda los

datos de prueba de cada uno de los equipos incluyendo los suyos, con esto se puede verificar el correcto funcionamiento de la comunicación.



6. Conclusiones

6.1. Sumario

Se analizaron las mayores dificultades para el desarrollo de redes de sensores inalámbricos, las necesidades existentes y las deficiencias de los equipos actuales, para desarrollar un equipo de menor costo y capaz de suplir las falencias existentes, para esto se probaron distintos tipos de circuitos integrados, topologías de redes y forma de almacenar los datos.

Los prototipos realizados son el comienzo de una posible línea de sensores, ya que se pueden utilizar en terreno, se pueden seguir mejorando las falencias vistas en las versiones antes mencionadas, la simplicidad de la configuración del equipo en terreno no permite los saltos de la información de equipo a equipo, solo topologías tipo estrella con un número máximo de nodos.

6.2. Conclusiones

Se construyeron distintas versiones de equipos con distintas capacidades técnicas, el nodo con sensores con comunicación digital (mediante I2C y SPI) y el nodo con los sensores análogos (geófonos), capaces de medir aceleraciones y velocidades respectivamente. Ambos nodos son capaces de asumir distintos roles en un sistema dotado de dos funcionalidades, maestro y esclavo.

Comparado a los equipos comerciales a los que se comparan las funcionalidades, el nodo de acelerómetros, es comparable con el nodo y parte del coordinador *Microstream*, se logra crear funcionalidades comparables a un costo menor a un tercio del producto comercial. En el caso del prototipo que presenta geófonos, también posee características similares, con el producto *Tromino* con el cual el costo se ve reducido en 40 veces su precio, sin considerar el cofre, aunque se le removieron funcionalidades no deseadas de este equipo.

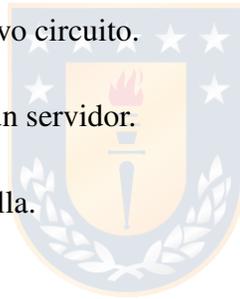
6.3. Trabajo Futuro

Como se ha ido mencionando a lo largo de este documento, las futuras mejoras que se realizarán en los prototipos se van haciendo necesarias a medida que se observa el funcionamiento y limitaciones de componentes que se dispone.

El prototipo se diseñó con el objetivo de ir mejorándolo, por lo que a corto plazo se realizarán

las siguientes mejoras, con las cuales se pretende mejorar el procesamiento, disminuir consumo de energía, disminuir tamaño del equipo y hacerlo más amigable para la interacción con el usuario.

- Probar conversores AD de 24bit para mayor resolución de los sensores análogos.
- Dejar de utilizar la tarjeta de desarrollo y utilizar solo el procesador o una versión más nueva.
- Agregar una pantalla de pre-visualización al dispositivo con el fin saber si está bien ajustada la sensibilidad.
- Realizar cálculos y pruebas de energía sin ocupar la tarjeta de desarrollo.
- Optimizar Convertidor de Voltaje para que la pila sea mejor utilizada.
- Miniaturización del Circuito.
- Nueva encapsulación para el nuevo circuito.
- Enviar datos de forma remota a un servidor.
- Nodo maestro avise cual nodo falla.



Bibliografía

- [1] (2014) Accessed may 2015. [Online]. Available: <http://www.cchc.cl/wp-content/uploads/2014/05/2014.05.29-Antofagasta-VMB-Monitoreo-e-Instrumentacion.pdf>
- [2] E. Figueiredo, et al. *Influence of the autoregressive model order on damage detection*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011, vol. 26, no 3, p. 225-238.
- [3] A. Rytter, "Vibrational based inspection of civil engineering structures," Doctoral dissertation, unknown, 1993.
- [4] D. H. Wang and W. H. Liao, "Instrumentation of a wireless transmission system for health monitoring of large infrastructures," in *Instrumentation and Measurement Technology Conf*, May. 2001, Proceedings of the 18th IEEE, pp. 634-639.
- [5] T. G. H. Basten and F. B. A. Schiphorst, "Structural health monitoring with a wireless vibration sensor network," in *ISMA Conf. on Noise and Vibration Engineering*, Jan. 2012, pp. 35-47.
- [6] C. Gu, J. Rice and C. Li, "A wireless smart sensor network based on multi-function interferometric radar sensors for structural health monitoring," in *Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), 2012 IEEE Topical Conf*, Jan. 2012, pp. 33-36.
- [7] T. D. Tan, N. T. Anh and G. G. Anh, "Low-cost Structural Health Monitoring Scheme Using MEMS-based Accelerometers," in *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), Second International Conf*, Jan. 2011, pp. 217-220.
- [8] S. N. Pakzad, S. Kim, G. L. Fenves, S. D. Glaser, D. E. Culler and J. W. Demmel, "Multi-purpose wireless accelerometers for civil infrastructure monitoring," in *Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Sep. 2005.
- [9] J. Paek, K. Chintalapudi, J. Caffrey, R. Govindan, and S. Masri, "A wireless sensor network for structural health monitoring: Performance and experience," Center for Embedded Network Sensing, 2005.
- [10] S. N. Pakzad, G. L. Fenves, S. Kim, and D. E. Culler, "Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring," *Journal of Infrastructure Systems*, 2008.
- [11] E. Mayorga and F. Cerda, "Consideraciones para el diseño de sistemas de monitoreo de puentes" in *First International Bridges Conf. – Chile 2014, Future Challenges: Design, Construction and Maintenance*, Santiago, Chile, Sep. 2014.
- [12] R. K. R. Yarlagadda, *Analog and Digital Signals and Systems*, Vol. 1, New York: Springer, 2010.

- [13] C. J. Savant Jr, M. S. Roden and G. Carpenter, *Diseño Electrónico*, 3era ed. Prentice-Hall, cap. 13.
- [14] M. Thomsom, *Intuitive Analog Circuit Design*, 2nd ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014.
- [15] R.W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, New York, USA, 2001.
- [16] A. Torres and F. Cerda “Análisis de la Segmentación de la señal para la detección de daño en un puente de grandes luces utilizando coeficientes Modelo AR” in *Cong. 11er Congreso internacional PROVIAL*, Valdivia, Chile, Oct. 2014.
- [17] (2014) Monitoreo de Pérdidas en Redes de Distribución de Agua — CIDERE BIO BIO. Accessed may 2015. [Online]. Available: <http://www.ciderebiobio.cl/?p=1642#more-1642>
- [18] Brincker, Rune, Lingmi Zhang and P. Andersen. ”Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition.” *Proc. of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas. 2000.
- [19] J. Espinoza and D. Sbárbaro, *Apuntes Sistema Lineales Dinámicos - 543 214*, 14th edition, 2015.
- [20] J. E. Briceño, *Transmisión de datos*, Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería, Departamento de Publicaciones, Mérida. Abril 2005.
- [21] Farrar, Charles R., and Keith Worden. *Structural health monitoring: a machine learning perspective*, John Wiley & Sons, 2012.
- [22] S. Eberlein and O. Vázquez, *Notas de Clase, Amplificadores de Instrumentación*, 1st edition, 2012.
- [23] ChaN, FatFs [Online]. Available: http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html
- [24] Y. Zhang, L. T. Yang and J. Chen *RFID and Sensor Networks: architectures, protocols, security, and integrations*, CRC Press, New York, USA, 2010.
- [25] R. Xie and X. Jia ”Transmission-efficient clustering method for wireless sensor networks using compressive sensing.” in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 2014, vol. 25, no 3, pp. 806-815.

Anexo A: Códigos

Los códigos a continuación son parte fundamental del prototipo desarrollado, se modificó para que todas las funciones quedaran de acuerdo a su categoría en librerías, de forma que con un simple diagrama de flujo se pueda entender la codificación y programación de la tarjeta de desarrollo.

A.1. Main y Loop, main.h

```

#include "stm32f4xx.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_spi.h"
#include "stm32f4xx_usart.h"
#include "stm32f4xx_i2c.h"
#include "stm32f4xx_tim.h"
#include "misc.h"

volatile int Ciclo_Actual=0;

#define SD_USES_SPI4 1
#define MASTER 0

void chop_tat (void);
#define TRUE 1
#define FALSE 0
#include "HAL_MPU6050.h"
#include "MPU6050.h"
#include "MPU6050.c"
#include "SD.h"
#include "USART.h"
#include "LIS.h"
#include "MPU.h"
#include "NRF.h"
#include "TIM.h"
unsigned char tx_buff [32]={0};
unsigned char rx_buff [32]={0};
unsigned char Tx_Buf[32]=
{
    0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
    0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
    0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
    0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00
};
unsigned char Triple_buff [90]=

```




```

GPIO_InitStructure .GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;

#if MASTER
  GPIO_Init(GPIOD, &GPIO_InitStructure);
#else
  GPIO_Init(GPIOD, &GPIO_InitStructure);
#endif

  int Ciclo_Asignado=5;
  // Init WIFI
  USART Wifi;
  Wifi. init ();
  // Wifi. println (" Started ?");
  // Init LIS331
#if !MASTER
  LIS LISsensor(
    GPIO_Pin_8,GPIO_PinSource8,GPIOD,RCC_AHB1Periph_GPIOD,
    GPIO_Pin_13,GPIO_PinSource13,GPIOD,RCC_AHB1Periph_GPIOD,
    GPIO_Pin_14,GPIO_PinSource14,GPIOD,RCC_AHB1Periph_GPIOD,
    GPIO_Pin_15,GPIO_PinSource15,GPIOD,RCC_AHB1Periph_GPIOD,
    SPI2,RCC_APB1Periph_SPI2,GPIO_AF_SPI2);
  LISsensor. spi_configure ();
  LISsensor. config_lis331 ();
  // Init MPU6050

  MPUsensor MPU1;
  MPU1.init_I2C1(); // GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12);
  MPU6050_Initialize(); // MPU1.config();
#endif
  // NRF24
  unsigned char status ;
  NRF NRF1;
  NRF1.HW_Init();
#if MASTER
  NRF1.TX_Mode();
#endif
#if !MASTER
  NRF1.RX_Mode();
#endif

  // Borrar a futuro

```

```

SD Datos;
//GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_14|GPIO_Pin_15);
Datos. spi_configure ();
//GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_14|GPIO_Pin_15);
Datos. init_SD ();
//GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_14|GPIO_Pin_15);
//GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_14|GPIO_Pin_15);
/* int var;
for ( i= 0; i < 512; i++)
{
    str [ i]=0xEE;
}

Datos.write_SD( str ,0);
GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_14|GPIO_Pin_15);
*/

uint16_t DatosLis [3];
uint16_t DatosMPU[6];
TIMER T2;
T2.config ();
int out=0;
int Time;
int j, k=0;

int cons=0;
volatile unsigned int Lin=0;
unsigned int sincromaster =0, sincromaster_old =0, count_s=0,aux_s=0;
int once_cicle ;
int sincro_number=5;
GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12);
int pack;
int Chn=0;
while(1)
{

#if !MASTER
    NRF1.TX_Mode();
    if (count_s >=sincro_number)
    {
        T2.wait ();
        MPU6050_GetRawAccelGyro(DatosMPU);
        LISsensor. read_lis331 (DatosLis);
    }
}

```



```

if (Ciclo_Actual>0)
{
    for (k = 0; k < 3; k++)
    {
        Triple_buff [2*k+((Ciclo_Actual-1)*18)] = 0xFF & (DatosLis[k]>>8);
        Triple_buff [2*k+1+((Ciclo_Actual-1)*18)] =0xFF & DatosLis[k];
    }
    for (k = 3; k < 9; k++)
    {
        Triple_buff [2*k+((Ciclo_Actual-1)*18)] = 0xFF & (DatosMPU[k]>>8);
        Triple_buff [2*k+1+((Ciclo_Actual-1)*18)] = 0xFF & DatosMPU[k];
    }
}
else
{
    for (k = 0; k < 3; k++)
    {
        Triple_buff [2*k+(4*18)] = 0xFF & (DatosLis[k]>>8);
        Triple_buff [2*k+1+(4*18)] =0xFF & DatosLis[k];
    }
    for (k = 3; k < 9; k++)
    {
        Triple_buff [2*k+(4*18)] = 0xFF & (DatosMPU[k]>>8);
        Triple_buff [2*k+1+(4*18)] = 0xFF & DatosMPU[k];
    }
}

```

```
GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_14);
```

```

if (Ciclo_Actual==Chn)
{
    NRF1.TX_Mode();
    GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_15);
    tx_buff [0]=0x1;
    tx_buff [1]=0x1;
    for (k=0;k<30;k++)
        tx_buff [k+2]= Triple_buff [k];
    NRF1.send(tx_buff);
    tx_buff [0]=0x2;
    tx_buff [1]=0x1;
    for (k=0;k<30;k++)
        tx_buff [k+2]= Triple_buff [k+30];
    NRF1.send(tx_buff);
    tx_buff [0]=0x3;
    tx_buff [1]=0x1;
}

```

```

    for(k=0;k<30;k++)
        tx_buff [k+2]= Triple_buff [k+60];
    NRF1.send(tx_buff);
    NRF1.DRX_Mode();
    GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_15);

}
Ciclo_Actual++;
if (Ciclo_Actual >=5)
    Ciclo_Actual -=5;

}
//Etapa Sincro Lista
if (count_s < sincro_number)
{
    Ciclo_Actual=4;
    //GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_14);
    if (NRF1.RxPacket(rx_buff))
    {
        Chn=Tx_Buf[0]
        // GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_14);
        if (sincromaster !=TIM2->CNT)
        {
            sincromaster=TIM2->CNT;
            count_s=0;
        }
        else
        {
            count_s++;
            if (count_s==sincro_number)
            {
                TIM2->CNT=5;
                GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_15);
            }
        }
    }
}

}

#endif
#if MASTER
    if (Ciclo_Actual==0)
    {
        NRF1.DRX_Mode();
        rx_buff [1]=0;

```

```

if (NRF1.RxPacket(rx_buff))
{
    Chn=1;
    pack=rx_buff [0];
    for (i=0;i<32;i++)
        str [i+pack*32]=rx_buff[i]

}

}
else if (Ciclo_Actual==1)
{
    NRF1.DRX_Mode();
    rx_buff [1]=0;
    if (NRF1.RxPacket(rx_buff))
    {
        Chn=2;
        pack=rx [0];
        for (i=0;i<32;i++)
            str [i+pack*32+Ciclo_Actual*96]=rx_buff[i]

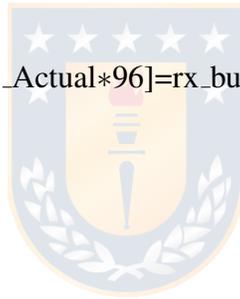
    }

}
else if (Ciclo_Actual==2)
{
    Tx_Buf[0]=0b00000000;
    NRF1.DRX_Mode();
    rx_buff [1]=0;
    if (NRF1.RxPacket(rx_buff))
    {
        Chn=3;
        pack=rx [0];
        for (i=0;i<32;i++)
            str [i+pack*32+Ciclo_Actual*96]=rx_buff[i]

    }

}
else if (Ciclo_Actual==3)
{
    Tx_Buf[0]=0b00000000;
    NRF1.DRX_Mode();
    rx_buff [1]=0;

```



```

if (NRF1.RxPacket(rx_buff))
{
    Chn=4;
    pack=rx [0];
    for (i=0;i<32;i++)
        str [i+pack*32+Ciclo_Actual*96]=rx_buff[i]

}
once_cicle =1;

}
else if (Ciclo_Actual==4)
{
    Tx_Buf[0]=0b00000000+Chn;
    if ( once_cicle )
    {
        NRF1.TX_Mode();
        NRF1.send(Tx_Buf);
        Datos.write_SD( str ,Lin);
        Lin++;

        once_cicle =0;
    }

}
#endif

}

}
// Borrar a futuro
void chop_tat (void)
{
    GPIO_ToggleBits(GPIOD, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_14|GPIO_Pin_15);
    //GPIO_ToggleBits(GPIOG, GPIO_Pin_12|GPIO_Pin_13|GPIO_Pin_14|GPIO_Pin_15);
}

```



Anexo B: Datasheets

B.1. STM32F4 Discovery



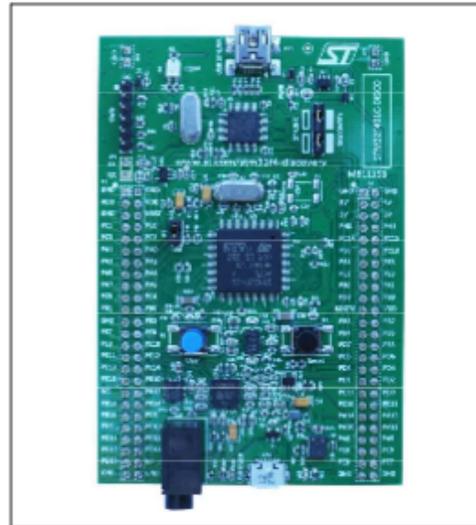
32F401CDISCOVERY

Discovery kit for STM32F401 line

Data brief

Features

- STM32F401VCT6 microcontroller featuring 256 KB of Flash memory, 64 KB of RAM in an LQFP100 package
- On-board ST-LINK/V2 with selection mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2 (with SWD connector for programming and debugging)
- Board power supply: through USB bus or from an external 5 V supply voltage
- External application power supply: 3 V and 5 V
- L3GD20: ST MEMS motion sensor 3-axis digital output gyroscope.
- LSM303DLHC: ST MEMS system-in-package featuring a 3D digital linear acceleration sensor and a 3D digital magnetic sensor.
- MP45DT02: ST MEMS audio sensor, omnidirectional digital microphone
- CS43L22, audio DAC with integrated class D speaker driver
- Eight LEDs:
 - LD1 (red/green) for USB communication
 - LD2 (red) for 3.3 V power on
 - Four user LEDs: LD3 (orange), LD4 (green), LD5 (red) and LD6 (blue)
 - Two USB OTG LEDs: LD7 (green) VBus and LD8 (red) over-current
- Two push-buttons (user and reset)
- USB OTG with micro-AB connector
- Extension header for LQFP100 I/Os for a quick connection to the prototyping board and an easy probing
- Comprehensive free software including a variety of examples, part of STM32CubeF4 package or STSW-STM32136 for legacy Standard Libraries usage



Description

The STM32F401 Discovery helps you to discover the entry level microcontrollers of the STM32 F4 series and to develop your applications easily. It offers everything required for beginners and experienced users to get started quickly.

Based on the STM32F401VCT6, it includes an ST-LINK/V2 embedded debug tool, a gyroscope, an e-compass and digital microphone ST MEMS, an audio DAC with an integrated class D speaker driver, an OTG micro-AB connector, LEDs and push-buttons.



B.2. Acelerómetro ADXL335



Small, Low Power, 3-Axis $\pm 3 g$ Accelerometer

ADXL335

FEATURES

3-axis sensing

Small, low profile package

4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm LFCSP

Low power : 350 μ A (typical)

Single-supply operation: 1.8 V to 3.6 V

10,000 g shock survival

Excellent temperature stability

BW adjustment with a single capacitor per axis

RoHS/WEEE lead-free compliant

APPLICATIONS

Cost sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications

Mobile devices

Gaming systems

Disk drive protection

Image stabilization

Sports and health devices

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of $\pm 3 g$. It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_X , C_Y , and C_Z capacitors at the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_LQ).

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

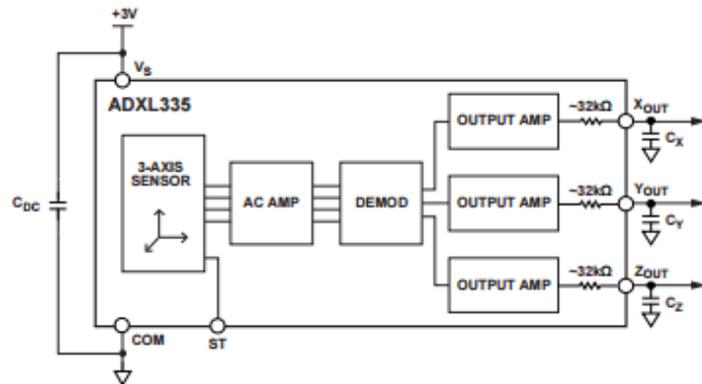


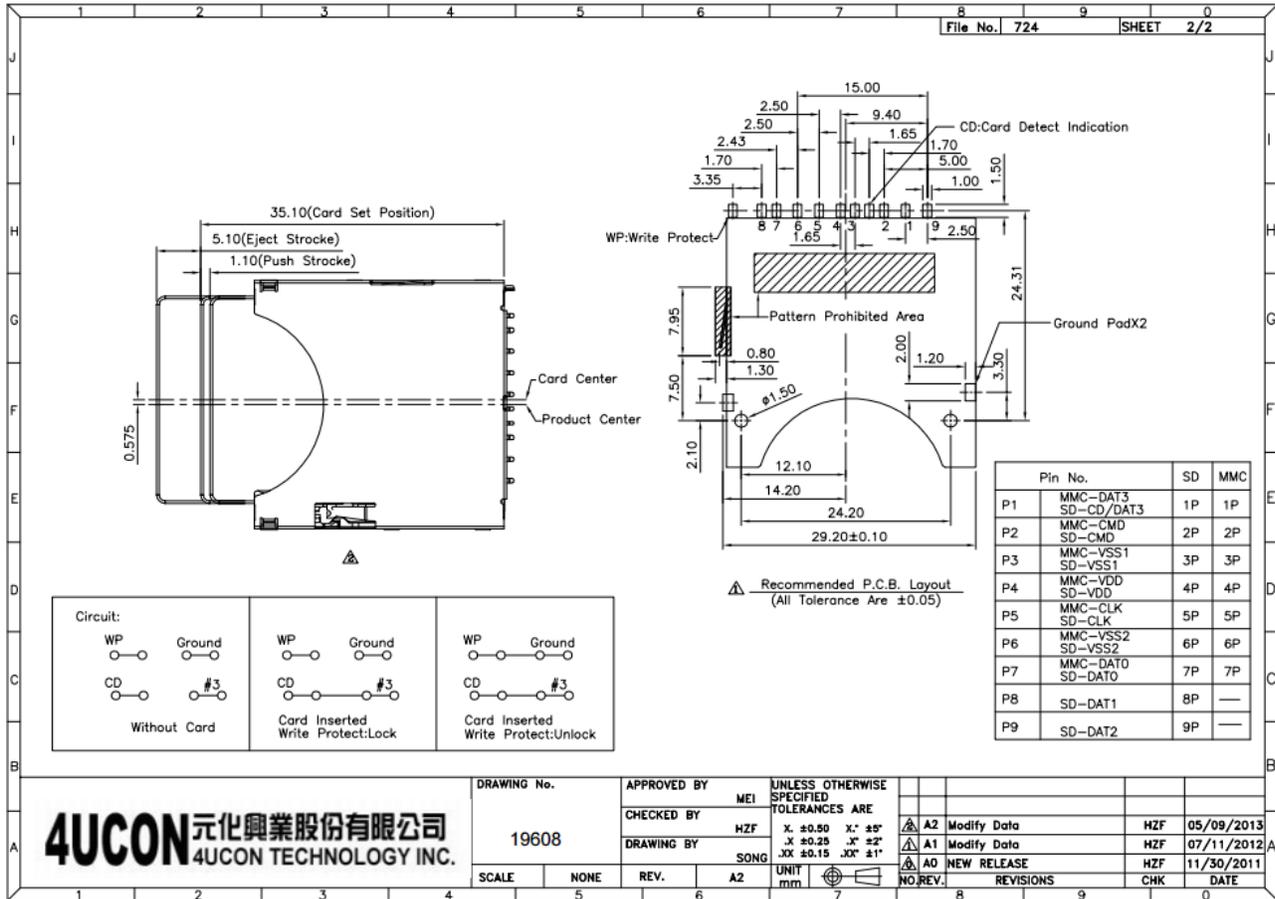
Figure 1.

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

B.3. Adaptador SD



Pin No.	SD	MMC
P1	MMC-DAT3 SD-CD/DAT3	1P 1P
P2	MMC-CMD SD-CMD	2P 2P
P3	MMC-VSS1 SD-VSS1	3P 3P
P4	MMC-VDD SD-VDD	4P 4P
P5	MMC-CLK SD-CLK	5P 5P
P6	MMC-VSS2 SD-VSS2	6P 6P
P7	MMC-DAT0 SD-DAT0	7P 7P
P8	SD-DAT1	8P —
P9	SD-DAT2	9P —

B.4. Geófono



SM-24 Geophone Element

Where Quality Data Starts

Features



- Tight specification, low-distortion geophone
- Extended spurious over 240 Hz, allowing full bandwidth at 2-ms sampling
- Backwards compatible with SM-4, SM-4 Superphone™ range, and SM-24ST
- Horizontal element available for shear-wave and 3-C recording.
- 3-year non-prorated warranty
- Lowest lifecycle cost of ownership in the industry
- Installed base of over 8 million worldwide (est.)

The SM-24 geophone element is designed to offer the highest performance in seismic exploration based upon field-proven I/O Sensor technology. Low distortion, combined with excellent specifications, provide high-fidelity data in 2-D and 3-D surveys. The extended bandwidth allows the full potential of 2-ms/24-bit recording systems to be realized. The tight specifications, unique element design, and exceptional quality of the Sensor SM-24 make it the lowest life cycle cost of ownership geophone in the industry.

Applications: 2-D & 3-D seismic exploration with bandwidth from 10 Hz up to 240 Hz.

Implementation: Can be installed in a variety of I/O Sensor geophone cases.



Specifications: SM-24 Geophone Element

Frequency

Natural frequency	10 Hz
Tolerance	± 2.5%
Maximum tilt angle for specified Fn	10°
Typical spurious frequency	>240 Hz

Distortion

Distortion coil to case velocity with 17.78mm/s (0.7 in/s) p.p.	<0.1%
Distortion measurement frequency	12 Hz
Typical distortion (string of 12 in series, measured at 12 Hz)	0.03 %

Damping

Open circuit (typical)	0.25
Damping calibration- shunt resistance	1,339 Ω
Damping with calibration shunt	0.6
Tolerance with calibration shunt	+ 5 %, - 0 %

Sensitivity

Sensitivity	28.8 V/m/s (0.73 V/in/s)
Tolerance	± 2.5 %
RtBcfn	6,000 Ω Hz
Moving mass	11 g (0.38 oz)
Max coil excursion p.p.	2 mm (0.08 in)

Coil Resistance

Standard	375 Ω
Tolerance	+/- 2.5 %

Physical Characteristics

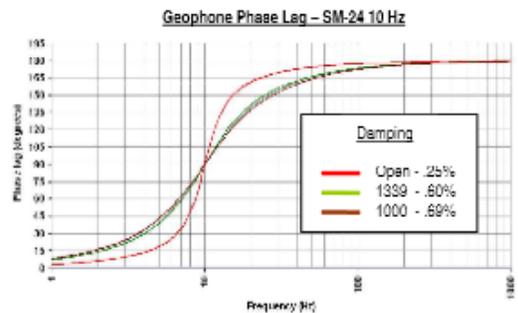
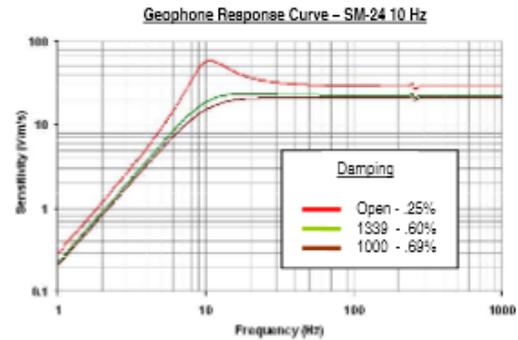
Diameter	25.4 mm (1 in)
Height	32 mm (1.26 in)
Weight	74 g (2.6 oz)
Operating temperature range	-40°C to +100°C (-40°F to +212°F)

Warranty Period*

3 years

* Warranty excludes damage caused by high voltage and physical damage to the element case.

All parameters are specified at +20°C in the vertical position unless otherwise stated.



Ordering Information

SM-24

SM-24/U-B 10 Hz 375 Ohm
(upright basic unit with insulating disc)

P/N 1004117

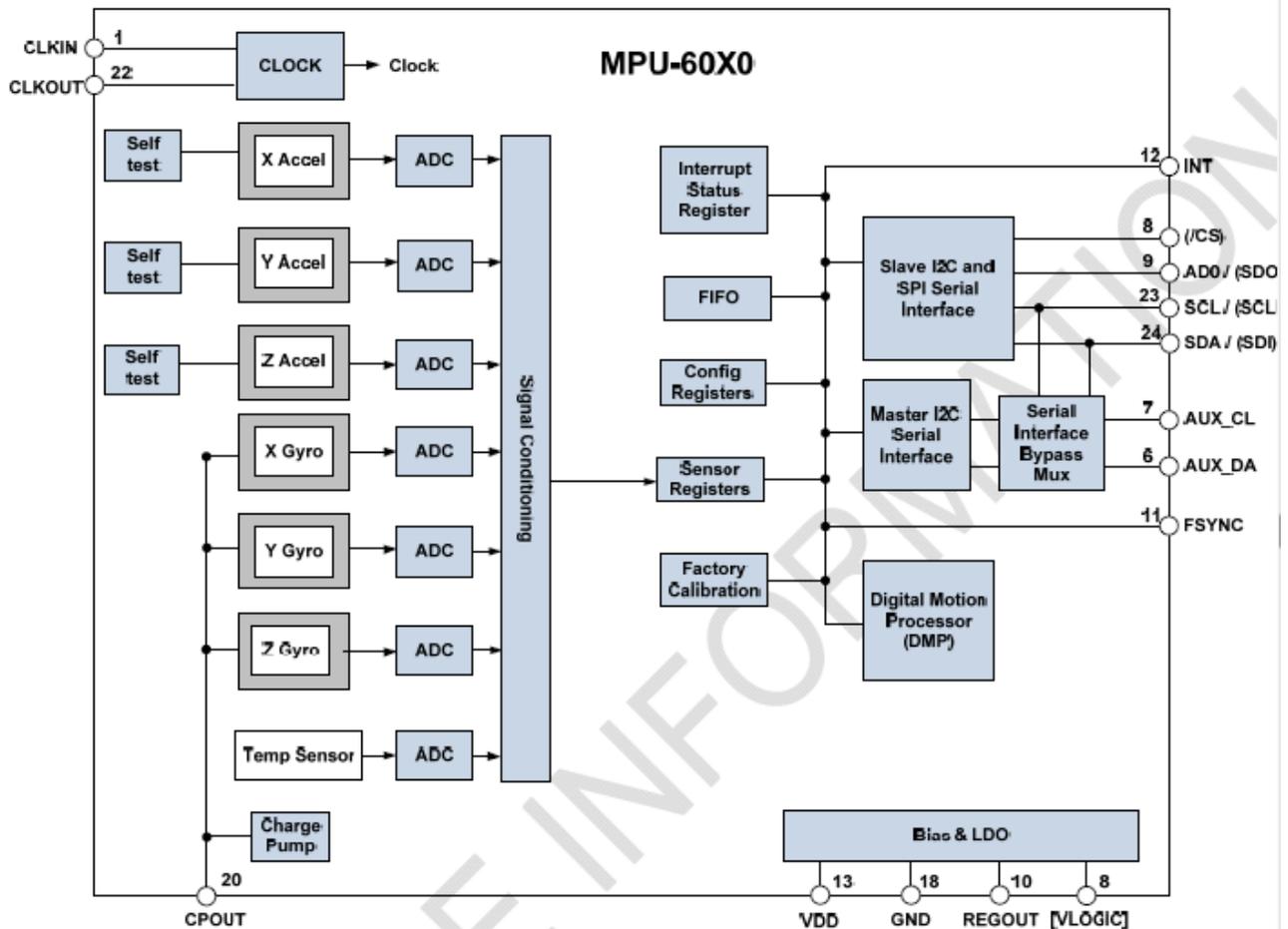
Europe
I/O Sensor Nederland bv
Fax +31 71 561 7145
Phone +31 71 560 1234

United States - Stafford, TX
Input/Output Inc.
Fax +1 281 879 3826
Phone +1 281 933 3339

England
Input/Output Inc.
Fax +44 1603 415143
Phone +44 1603 481020

Web Site
www.geophone.com
www.i-o.com

B.5. Acelerómetro y giroscopio, MPU-6050



Note: Pin names in round brackets () apply only to MPU-6000
Pin names in square brackets [] apply only to MPU-6050

7.6 Overview

The MPU-60X0 is comprised of the following key blocks and functions:

- Three-axis MEMS rate gyroscope sensor with 16-bit ADCs and signal conditioning
- Three-axis MEMS accelerometer sensor with 16-bit ADCs and signal conditioning
- Digital Motion Processor (DMP) engine
- Primary I²C and SPI (MPU-6000 only) serial communications interfaces
- Auxiliary I²C serial interface for 3rd party magnetometer & other sensors
- Cloning
- Sensor Data Registers
- FIFO
- Interrupts
- Digital-Output Temperature Sensor
- Accelerometer Self-test
- Bias and LDO
- Charge Pump

B.6. Acelerómetro, LIS331HH



LIS331HH

MEMS digital output motion sensor ultra low-power high full-scale 3-axes "nano" accelerometer

Preliminary data

Features

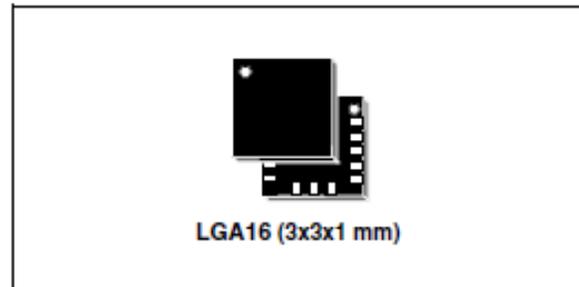
- Wide supply voltage, 2.16 V to 3.6 V
- Low voltage compatible IOs, 1.8 V
- Ultra low-current mode consumption down to 10 μ A
- $\pm 6g/\pm 12g/\pm 24g$ dynamically selectable full-scale
- I²C/SPI digital output interface
- 16 bit data output
- 2 independent programmable interrupt engines
- Sleep to wake-up function
- 6D orientation detection
- Embedded self-test
- 10000 g high shock survivability
- ECOPACK[®] RoHS and "Green" compliant (see [Section 8](#))

Applications

- Pedometer
- Gaming and virtual reality input devices
- Motion activated functions
- Impact recognition and logging
- Intelligent power saving for handheld devices
- Vibration monitoring and compensation

Description

The LIS331HH is an ultra low-power high performance high full-scale three axes linear



accelerometer belonging to the "nano" family, with digital I²C/SPI serial interface standard output.

The device features ultra low-power operational modes that allow advanced power saving and smart sleep to wake-up functions.

The LIS331HH has dynamically user selectable full scales of $\pm 6g/\pm 12g/\pm 24g$ and it is capable of measuring accelerations with output data rates from 0.5 Hz to 1 kHz. The self-test capability allows the user to check the functioning of the sensor in the final application.

The device contains 2 independent interrupt engines able to recognize dedicated inertial events.

Thresholds and timing of interrupt generators are programmable by the end user on the fly.

The LIS331HH is available in small thin plastic land grid array package (LGA) and it is guaranteed to operate over an extended temperature range from -40 °C to +85 °C.

B.7. Transceiver, RFM12B

RFM12B Universal ISM Band FSK Transceiver

DESCRIPTION

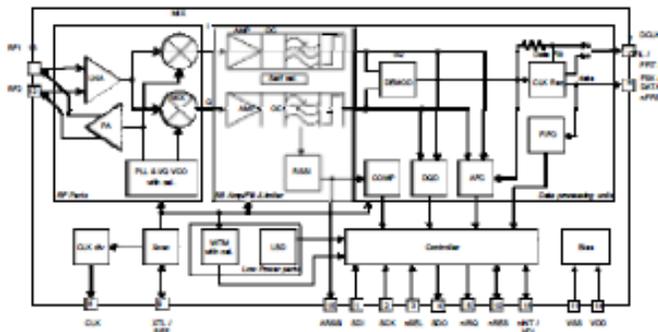
Hoperf' RFM12B is a single chip, low power, multi-channel FSK transceiver designed for use in applications requiring FCC or ETSI conformance for unlicensed use in the 433, 868 and 915 MHz bands. The RFM12B transceiver is a part of Hoperf' EZRadio™ product line, which produces a flexible, low cost, and highly integrated solution that does not require production alignments. The chip is a complete analog RF and baseband transceiver including a multi-band PLL synthesizer with PA, LNA, I/Q down converter mixers, baseband filters and amplifiers, and an I/Q demodulator. All required RF functions are integrated. Only an external crystal and bypass filtering are needed for operation.

The RFM12B features a completely integrated PLL for easy RF design, and its rapid settling time allows for fast frequency-hopping, bypassing multipath fading and interference to achieve robust wireless links. The PLL's high resolution allows the usage of multiple channels in any of the bands. The receiver baseband bandwidth (BW) is programmable to accommodate various deviation, data rate and crystal tolerance requirements. The transceiver employs the Zero-IF approach with I/Q demodulation. Consequently, no external components (except crystal and decoupling) are needed in most applications.

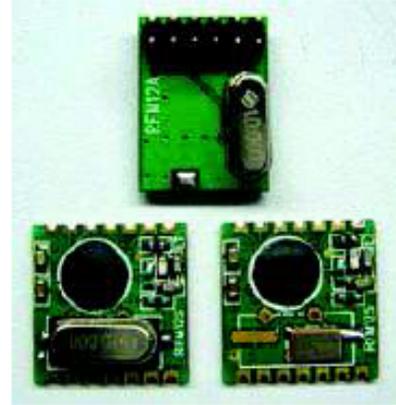
The RFM12B dramatically reduces the load on the microcontroller with the integrated digital data processing features: data filtering, clock recovery, data pattern recognition, integrated FIFO and TX data register. The automatic frequency control (AFC) feature allows the use of a low accuracy (low cost) crystal. To minimize the system cost, the RFM12B can provide a clock signal for the microcontroller, avoiding the need for two crystals.

For low power applications, the RFM12B supports low duty cycle operation based on the internal wake-up timer.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



RFM12B



FEATURES

- Fully integrated (low BOM, easy design-in)
- No alignment required in production
- Fast-settling, programmable, high-resolution PLL synthesizer
- Fast frequency-hopping capability
- High bit rate (up to 115.2 kbps in digital mode and 256 kbps in analog mode)
- Direct differential antenna input/output
- Integrated power amplifier
- Programmable TX frequency deviation (15 to 240 kHz)
- Programmable RX baseband bandwidth (67 to 400 kHz)
- Analog and digital RSSI outputs
- Automatic frequency control (AFC)
- Data quality detection (DQD)
- Internal data filtering and clock recovery
- RX synchron pattern recognition
- SPI compatible serial control interface
- Clock and reset signals for microcontroller
- 16-bit RX Data FIFO
- Two 8-bit TX data registers
- Low power duty cycle mode
- Standard 10 MHz crystal reference with on-chip tuning
- Wake-up timer
- 2.2 to 3.8 V supply voltage
- Low power consumption

- Low standby current (0.3 μ A)
- Compact 16 pin TSSOP package
- Supports very short packets (down to 3 bytes)
- Excellent temperature stability of the RF parameters
- Good adjacent channel rejection/blocking

TYPICAL APPLICATIONS

- Home security and alarm
- Remote control, keyless entry
- Wireless keyboard/mouse and other PC peripherals
- Toy controls
- Remote keyless entry
- Tire pressure monitoring
- Telemetry
- Personal/patient data logging
- Remote automatic meter reading

B.8. Conversor Análogo Digital 16Bit, ADS8331

www.ti.com

SRA5363 – DECEMBER 2009

Low-Power, 16-Bit, 500kSPS, 4-/8-Channel Unipolar Input ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS with Serial Interface

Check for Samples: ADS8331, ADS8332

FEATURES

- Low-Power, Flexible Supply Range:
 - 2.7V to 5.5V Analog Supply
 - 8.7mW (250kSPS in Auto-Nap Mode, VA = 2.7V, VBD = 1.65V)
 - 14.2mW (500kSPS, VA = 2.7V, VBD = 1.65V)
- Up to 500kSPS Sampling Rate
- Excellent DC Performance:
 - ± 1.2 LSB Typ, ± 2 LSB Max INL at 2.7V
 - ± 0.6 LSB Typ, $-1.0/1.5$ LSB Max DNL at 2.7V
 - 16-Bit NMC Over Temperature
- Excellent AC Performance at 5V, $f_{IN} = 1$ kHz:
 - 91.5dB SNR, 101dB SFDR, -100 dB THD
- Flexible Analog Input Arrangement:
 - On-Chip 4-/8-Channel Mux with Breakout
 - Auto/Manual Channel Select and Trigger
- Other Hardware Features:
 - On-Chip Conversion Clock (CCLK)
 - Software/Hardware Reset
 - Programmable Status/Polarity EOC/INT
 - Daisy-Chain Mode
 - Global $\overline{\text{CONVST}}$ (Independent of CS)
 - Deep, Nap, and Auto-Nap Powerdown Modes
 - SPI™/DSP Compatible Serial Interface
 - Separate I/O Supply: 1.65V to VA
 - SCLK up to 40MHz (VA = VBD = 5V)
- 24-Pin 4x4 QFN and 24-Pin TSSOP(1) Packages

APPLICATIONS

- Communications
- Transducer Interfaces
- Medical Instruments
- Magnetometers
- Industrial Process Control
- Data Acquisition Systems
- Automatic Test Equipment

DESCRIPTION

The ADS8331 is a low-power, 16-bit, 500k samples-per-second (SPS) analog-to-digital converter (ADC) with a unipolar, 4-to-1 multiplexer (mux) input. The device includes a 16-bit capacitor-based successive approximation register (SAR) ADC with inherent sample and hold.

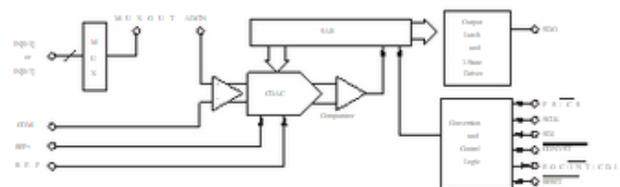
The ADS8332 is based on the same core and includes a unipolar 8-to-1 input mux. Both devices offer a high-speed, wide-voltage serial interface and are capable of daisy-chain operation when multiple converters are used.

These converters are available in 24-pin, 4x4 QFN and 24-pin TSSOP(1) packages and are fully specified for operation over the industrial -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ temperature range.

Low-Power, High-Speed, SAR Converter Family

RESOLUTION/TYPE	CHANNELS	500kSPS	1MHz
16-Bit Pseudo-Diff	1	ADS8327	ADS8329
	2	ADS8328	ADS8330
	4	ADS8331	—
	8	ADS8332	—
14-Bit Pseudo-Diff	1	—	ADS7279
	2	—	ADS7280
	4	ADS8301	—
	8	ADS8302	—
12-Bit Pseudo-Diff	1	—	ADS7229
	2	—	ADS7230

Functional Block Diagram



(1) TSSOP (PW) package available Q1, 2010.

B.9. Módulo Wi-Fi, ESP8266



Espressif Systems

ESP8266 Datasheet

1. General Overview

1.1. Introduction

Espressif Systems' Smart Connectivity Platform (ESCP) is a set of high performance, high integration wireless SOCs, designed for space and power constrained mobile platform designers. It provides unsurpassed ability to embed WiFi capabilities within other systems, or to function as a standalone application, with the lowest cost, and minimal space requirement.

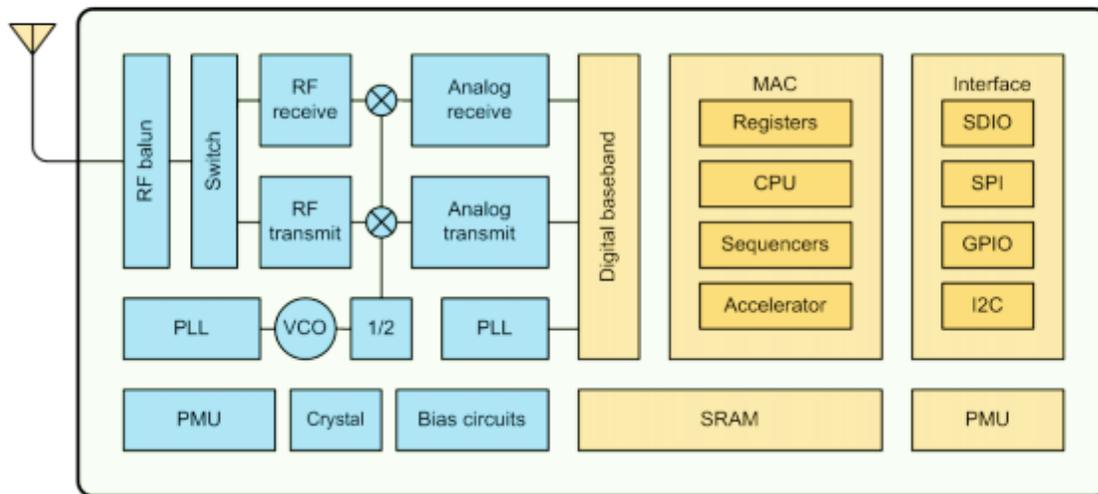


Figure 1 ESP8266EX Block Diagram

ESP8266EX offers a complete and self-contained WiFi networking solution; it can be used to host the application or to offload WiFi networking functions from another application processor.

When ESP8266EX hosts the application, it boots up directly from an external flash. It has integrated cache to improve the performance of the system in such applications.

Alternately, serving as a WiFi adapter, wireless internet access can be added to any micro controller-based design with simple connectivity (SPI/SDIO or I2C/UART interface).

ESP8266EX is among the most integrated WiFi chip in the industry; it integrates the antenna switches, RF balun, power amplifier, low noise receive amplifier, filters, power management modules, it requires minimal external circuitry, and the entire solution, including front-end module, is designed to occupy minimal PCB area.

ESP8266EX also integrates an enhanced version of Tensilica's L106 Diamond series 32-bit processor, with on-chip SRAM, besides the WiFi functionalities. ESP8266EX is often integrated with external sensors and other application specific devices through its GPIOs; sample codes for such applications are provided in the software development kit (SDK).

B.10. Módulo Antena RF 2.4Ghz, NRF24

nRF24L01+

Single Chip 2.4GHz Transceiver

Preliminary Product Specification v1.0

Key Features

- Worldwide 2.4GHz ISM band operation
- 250kbps, 1Mbps and 2Mbps on air data rates
- Ultra low power operation
- 11.3mA TX at 0dBm output power
- 13.5mA RX at 2Mbps air data rate
- 900nA in power down
- 26µA in standby-I
- On chip voltage regulator
- 1.9 to 3.6V supply range
- Enhanced ShockBurst™
- Automatic packet handling
- Auto packet transaction handling
- 6 data pipe MultiCeiver™
- Drop-in compatibility with nRF24L01
- On-air compatible in 250kbps and 1Mbps with nRF2401A, nRF2402, nRF24E1 and nRF24E2
- Low cost BOM
- ±60ppm 16MHz crystal
- 5V tolerant inputs
- Compact 20-pin 4x4mm QFN package

Applications

- Wireless PC Peripherals
- Mouse, keyboards and remotes
- 3-in-1 desktop bundles
- Advanced Media center remote controls
- VoIP headsets
- Game controllers
- Sports watches and sensors
- RF remote controls for consumer electronics
- Home and commercial automation
- Ultra low power sensor networks
- Active RFID
- Asset tracking systems
- Toys

Anexo C: Manual

C.1. Configuración predeterminada

Los equipos están configurados para trabajar en una topología estrella o cada nodo por separado, en la topología estrella cada nodo es sincronizado por el nodo maestro, mientras que cuando no se configura el maestro cada uno funciona aparte.

C.2. Modo de Uso

1. Encender equipo Maestro.(Opcional)
2. Encender equipos esclavos, si es que está el equipo maestro, lo mas cerca posible de este, luego alejarlo y al lugar deseado, en caso de estar fuera de rango se encenderá la luz de Error de Sincronía.
3. Esperar 30 segundos por cada nodo encendido y esperar que prenda el led de sincronía, si este led no se prende, se prenderá el led de equipo autónomo.
4. Esperar el tiempo de muestreo de datos seleccionado o retirar el equipo cuando se desee.

C.3. Extracción de datos

Para la extracción de datos es necesario utilizar un computador con sistema operativo windows:

1. Retirar la tarjeta micro SD del equipo.
2. Introducir la tarjeta al computador y decirle que **NO** le de formato nuevo a la tarjeta.
3. Ejecutar el Programa *.exe* y esperar a que este programa traduzca los datos a *.txt*.
4. Una vez finalizado el programa, los datos estarán ordenados en diferentes archivos con la fecha actual del computador y el nombre del sensor/variable correspondiente.