UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2016

PROGRAMACIÓN E UNA RED DE SENSORES PARA LA RECOLECCIÓN Y TRANSMISIÓN DE DATOS DE ONDAS SÍSMICAS

LUCA CUELLO, FRANCO STEPHANO

http://hdl.handle.net/11673/23701

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO – CHILE

PROGRAMACIÓN DE UNA RED DE SENSORES PARA LA RECOLECCIÓN Y TRANSMISIÓN DE DATOS DE ONDAS SÍSMICAS.

RICARDO FELIPE ARDILES GÓMEZ

FRANCO STEPHANO LUCA CUELLO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL TELEMÁTICO

PROFESOR GUÍA: DR. WALTER GROTE

PROFESOR CORREFERENTE: DR. AGUSTIN GONZALEZ

Noviembre - 2016

Agradecimientos

Agradecimientos generales al Profesor Walter Grote por tener siempre la disponibilidad y disposición de guiar, corregir y ayudarnos; al Departamento de Obras Civiles, en especial al Profesor René Tobar, por prestarnos la mesa vibradora para nuestras pruebas; a las Secretarias tanto del Departamento de Electrónica como de Telemática por aclarar cualquier duda con respecto al protocolo correspondiente a la memoria y a todos los profesores que fueron parte de nuestra carrera universitaria.

Agradecimientos personales a la Sra. Laura Vitali, por no tener problemas en que me quedara en la pensión, donde arrendé un par de años, los días que necesitaba trabajar en la memoria; a mis amigos de pensión por alojarme, en especial a Rodrigo Rivera y Cesar Sierra; y por último, a mi amiga Macarena Gallardo, por darme alojamiento también un par de ocasiones. (Franco Luca)

Agradecimientos personales a mis padres, porque todo lo que soy se lo debo a ellos, a mi hermana por brindarme siempre su sonrisa, a mis abuelos por educarme y entregarme su cariño incondicional, a mis padrinos por todo su apoyo y por tratarme siempre como un hijo, a mi polola Javiera por entregarme tanto cariño y apoyo en los momentos finales de mi carrera y, por último, a mis grandes amigos: Eduardo, Gabriel, Nicole, Jorge, Byron, Martín, Diego, Matías, Jurgen, Nicolás, Sebastián, Pablo, Macarena, Carmen, Francisca y Rodrigo. Gracias totales. (Ricardo Ardiles)

Dedicatoria

Dedicado a mis padres, mis abuelos, mi hermana y a mi polola Lorena Espinoza, por todo el apoyo incondicional y amor entregado. (Franco Luca)

Dedicado a mi madre, hoy cumplo una promesa. (Ricardo Ardiles)

Programación de una red de sensores para la recolección y transmisión de datos de ondas sísmicas

Ricardo Felipe Ardiles Gómez
&
Franco Stephano Luca Cuello

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Telemático
Profesor guía: Walter Grote
Noviembre – 2016

Resumen

Chile es un país propenso a temblores y terremotos que frecuentemente causan daños a la infraestructura e incluso pueden causar daños a seres humanos y al ganado. Por lo tanto, es un objetivo deseable desarrollar sistemas de alerta temprana y monitoreo de terremotos. Este proyecto tiene como objetivo probar el desarrollo de una red de sensores inalámbricos (WSN) utilizando una plataforma Libelium® para obtener, transmitir y recolectar datos de eventos sísmicos en un sitio web. Se analiza la viabilidad de poder muestrear, transmitir y almacenar información sísmica para su visualización usando dos protocolos de comunicación inalámbrica, Zigbee y GPRS (General Packet Radio Service). Para el despliegue y analisis de información almacenada del evento sísmico se desarrolla y ensaya una aplicación web, para lo cual, se utilizan algoritmos de procesamiento de señales, con el fin de encontrar patrones que permitan comparar los datos sísmicos.

Nuestros resultados indican que generar una alerta temprana utilizando la red implementada depende en gran medida del método de acceso a la comunicación que se va a utilizar. Mientras que GPRS tiene una amplia cobertura, la latencia es el principal problema, mientras que Zigbee provee una tasa de transmisión mayor y más confiable a con cobertura territorial más limitada, dependiendo de las características de los enlaces.

Palabras clave: WSN, Zigbee, GPRS, sismos, aplicación web, alerta temprana.

Data collection and transmission of seismic waves using a wireless sensor network

Ricardo Felipe Ardiles Gómez
&
Franco Stephano Luca Cuello

Final project report towards the fulfillment of Ingeniero Civil Telemático,
(6 year engineering program)

Advisor: Walter Grote
November – 2016

Summary

Chile is a tremor and earthquake prone country that frequently cause infrastructure damage and may even take a toll of humans and livestock. Therefore it is a desirable goal, to develop early warning and monitoring systems for earthquakes. This project is aimed at testing the development of a wireless sensor network (WSN) using a Libelium® platform for obtaining, transmitting and collecting seismic event data on a website. Two wireless communication protocols, Zigbee and GPRS (General Packet Radio Service), are tested in order to analyze the feasibility of being able to sample, transmit and store seismic information for display on a website, which runs a web application for the characterization of the seismic event is developed and tested. Signal processing algorithms are used to find patterns of seismic events.

Our findings are that generating early warning depends heavily on the communication access method to be used. While GPRS has an extensive coverage, latency is the main issue, whereas the Zigbee protocol provides a higher and more reliable data transmission, although at the expense of more limited coverage, depending on the wireless link characterisitcs.

Keywords: WSN, Zigbee, GPRS, seismic wave, web application, early warning alert.

Glosario

WSN	Wireless Sensor Netowk
3D	Tres dimensiones
MEMS	Microelectromechanical Systems
CSN	Centro Sismológico Nacional
NEIC	National Earthquake Information Center
USGS	United States Geological Survey
GPRS	General Packet Radio Service
SMS	Short Message Service
JMA	Japan Meteorological Agency
EEW	Earthquake Early Warning
STA/LTA	Short Time Average over Long Time Average
FTSP	Flooding Time Synchronization Protocol
GPS	Global Positioning System
SPs	SmartPhones
IS	Intermediate Server
CC	Control Center
RAM	Random Access Memory
USB	Universal Serial Bus
IDE	Integrated Development Environment
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
URL	Uniform Resource Locator
APN	Access Point Name
SIM	Subscriber Identity Module
LOS	Line of Sight
NLOS	Non Line of Sight
RENADIC	Red Nacional de Cobertura Nacional de Acelerógrafos

Índice

Agradecimientos i

Dedicatoria ii

Resumen iii

Summary iv

Índice vi

Índice de Figuras 9

Índice de Tablas 15

Índice de CD 16

Capítulo 1: Introducción y Objetivos 17

1.1. Introducción 17

1.2. Definición y Contribuciones del proyecto 18

1.3. Objetivos 19

1.3.1. Objetivos Generales 19

1.3.2. Objetivos Específicos 19

1.4. Organización del documento 20

Capítulo 2: Estado del Arte 22

2.1. Utilización de WSN en la detección de sismos 22

2.1.1. Sistema de alerta temprana de sismos de Japón 22

2.1.2. Sistema de monitoreo de sismos volcánicos 23

2.1.3. Sistema Distribuido de Detección de Sismos Usando una Red de Sensores Inalámbrica para Alerta Temprana. 25

2.1.4. Red de alerta temprana de terremotos basada en celulares instalada en Chile por USGS. 27

2.2 Caracterización de un evento sísmico 28

2.2.1 Caracterización de un evento volcano-tectónico 29

2.3 Selección y adquisición de una plataforma WSN 30

Capítulo 3: Transmisión Inalámbrica mediante Sensores Libelium 33

3.1. Programación del nodo Libelium para transmisión mediante Zigbee 34

3.2. Programación del nodo Libelium para transmisión mediante GPRS 40

Capítulo 4: Programación de una aplicación web para recolección de Datos Sísmicos 43

4.1. Desarrollo del concepto de la aplicación web 43

4.1.1. Identificación de la comunidad usuaria 43

4.1.2. Identificación de los aspectos técnicos 44

4.2. Investigación y análisis de requerimientos 44

4.3. Concepción de diseño y creación de prototipos 45

4.3.1. Concepción de diseño 45

4.3.2. Creación de prototipos 48

4.4. Implementación de la aplicación web 48

4.4.1. Registro en vivo mediante Zigbee 50

4.4.2. Caracterización 51

4.4.3. Registro histórico de movimientos sísmicos 52

4.5. Mantención de la aplicación web 53

Capítulo 5: Procesamiento de la información para generar Alerta Temprana 54

Capítulo 6: Procesamiento de la información para la Caracterización de Ondas Sísmicas 59

Capítulo 7: Presentación y análisis de resultados 67

7.1. Zigbee 67

7.1.1. Ruido 67

7.1.2. Tasa de Transmisión 69

7.1.3. Comparación con Registro sin transmisión 72

7.2. GPRS 74

7.2.1. Tasa de Transmisión 74

7.3. Alerta Temprana 75
7.4. Caracterización 76
7.4.1. Ruido 76
7.4.2. Transmisión con línea vista 78
7.4.3. Transmisión sin línea vista 79
7.4.4. Registro sin transmisión 80
7.4.5. Transmisión mediante GPRS 81
7.5. Registros de Sísmo Histórico 81
7.6. Mesa vibradora 85
Capítulo 8: Conclusiones 86
Bibliografía 88

Índice de figuras

Figura 1.1: Registro de Sismos en Chile entre 1901 y 1951 sobre 5 grados, Escala Richter. [3] 17

Figura 1.2: Registro de Sismos en Chile entre 1952 y 2016 sobre 5 grados, Escala Richter. [3] 18

Figura 2.1: Representación del sistema EEW de JMA[7]..... 22

Figura 2.2: Nodos en Volcán Cotopaxi[15]. 24

Figura 2.3: Estaciones Receptoras en Volcán Cotopaxi[15]..... 24

Figura 2.4: Arquitectura en 3 niveles: Nivel 1 - Red de smartphones, Nivel 2 - Servidores intermedios - Nivel 3: Centro de control y toma de decisiones.[2] 25

Figura 2.5: Ecuación de aceleración neta[2]. 26

Figura 2.6: Proceso de detección de valor máximo en un SmartPhone. 27

Figura 2.7: SmartPhone instalado en Santiago, CSN.[19] 28

Figura 2.8: Definición de ventanas de observación y superposición.[23] 29

Figura 2.9: Función de autocorrelación r(k) donde k representa el atraso, N representa el número de muestras por ventana y n corresponde a la ventana deslizante[20]..... 29

Figura 2.10: Función de autocorrelación normalizada ρ1[20] 30

Figura 2.11: Waspmote Libelium[25]..... 31

Figura 2.12: Movimiento en 3D (Izquierda), Terminales de Aceler´metro (Derecha)[26] 32

Figura 3.1: Módulo Zigbee. [28]..... 34

Figura 3.2: Sketch del entorno de desarrollo. (Elaboración Propia) 35

Figura 3.3: Código para obtener aceleración neta y su respectivo tiempo. (Elaboración Propia) 35

Figura 3.4: Código para empaquetar los datos. (Elaboración Propia) 37

Figura 3.5: Código para hacer envío de Tramas mediante Zigbee. (Elaboración Propia) 37

Figura 3.6: WSN con topología estrella.[28] 37

Figura 3.7: Red Zigbee para la investigación. (Elaboración Propia) 38

Figura 3.8: Prueba de conexión mediante XCTU. (Elaboración Propia) 38

Figura 3.9: Código para imprimir por Serial el trama recibido por Zigbee. (Elaboración Propia) 39

Figura 3.10: Respuesta de Monitor Serial del Waspmote PRO IDE. (Elaboración Propia) 39

Figura 3.11: Módulo GPRS.[33] 40

Figura 3.12: Código para obtener datos y agregarlos a laTrama. (Elaboración Propia) 41

Figura 3.13: Envío de trama mediante método GET a una URL 41

Figura 3.14: Red GPRS creada para la investigación. (Elaboración propia) 42

Figura 4.1: Vista principal USGS Earthquake Hazard Program[34] 45

Figura 4.2: Vista principal JMA Earthquake Information[35] 46

Figura 4.3: Vista principal CSN [36] 47

Figura 4.4: Vista principal Aplicación web de la Red de Sensores. (Elaboración Propia) 48

Figura 4.5: Diagrama de flujo de todos los procesos de la investigación (Elaboración propia) 49

Figura 4.6: Vista del Registro en vivo mediante Zigbee. (Elaboración propia) 50

Figura 4.7: Caracterización del evento sísmico. (Elaboración Propia) 51

Figura 4.8: Vista de representación de movimientos sísmicos anteriores. (Elaboración Propia) 52

Figura 4.9: Vista de representación de movimientos sísmicos anteriores con filtrado. (Elaboración Propia) 52

Figura 5.1: Arribo de ondas P y S en una estación de 3 componentes, Prado, Red Sismológica de Colombia.[38] 54

Figura 5.2: Análisis gráfico de onda P para una aceleración neta, sismo de Concepción 2010. (Elaboración Propia) 55

Figura 5.3: Análisis gráfico de onda P para aceleración neta, sismo de Hualañé 2010. (Elaboración Propia) 56

Figura 5.4: Ventanas STA y LTA que avanzan en el tiempo hacia la derecha.[41] ... 57

Figura 5.5: Análisis para selección de umbral de detección de onda P, sismo Hualañe 2010. (Elaboración Propia) 58

Figura 5.6: Análisis para selección de umbral de detección de onda P, sismo Talca 2010. (Elaboración propia) 58

Figura 6.1: Código para determiner tasas de muestreo. (Elaboración Propia) 60

Figura 6.2: Aceleración Neta sin procesamiento. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia) 61

Figura 6.3: Aceleración neta con filtrado de ruido mediante Wavelet. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia) 62

Figura 6.4: Función de autocorrelación de Aceleración después de la transformada Wavelet con una ventana de 50 datos. Tiempo [s] (Elaboración Propia) 63

Figura 6.5: Función de autocorrelación de Aceleración después de la transformada Wavelet con una ventana de 100 datos. Tiempo [s] (Elaboración Propia) 63

Figura 6.6: Función de normalización ρ1max.[20] 64

Figura 6.7: Función de normalización ρ1min.[20] 64

Figura 6.8: Función de normalización ρ1max con ventana de 100 datos. (Elaboración propia) 65

Figura 6.9: Función de normalización ρ1max con ventana de 100 datos después de transformada Wavelet. (Elaboración propia) 65

Figura 6.10: Función de normalización ρ1min con ventana de 100 datos. (Elaboración propia) 66

Figura 6.11: Función de normalización ρ1min con ventana de 100 datos después de transformada Wavelet. (Elaboración propia) 66

Figura 7.1: Aceleración medida con el transmisor estático. Aceleración en [G] y Tiempo en [s]. (Elaboración Propia) 67

Figura 7.2: Correlación de aceleración medida con transmisor estático. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia) 68

Figura 7.3: Escenario de transmisión con y sin Línea de Vista. Cancha UTFSM. (Elaboración Propia) 69

Figura 7.4: Tasa de transmisión en Línea de Vista con transmisor estático. Aceleración [G] y Tiempo [s] (Elaboración propia) 70

Figura 7.5: Tasa de transmisión en Línea de Vista con transmisor experimentando movimiento. Acceleración [G] y Tiempo [s] (Elaboración propia) 70

Figura 7.6: Tasa de transmisión sin Línea de Vista con transmisor experimentando movimiento. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia) 71

Figura 7.7: Registro sin transmisión, almacenado en una SD. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia) 72

Figura 7.8: Registro de la señal transmitida por Zigbee. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia) 73

Figura 7.9: Monitor Serial de la transmisión GPRS. (Elaboración Propia) 74

Figura 7.12: Aceleración registrada en mesa vibradora y umbral producido. (Elaboración propia) 75

Figura 7.13: Registro original de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia) 76

Figura 7.14: Registro con transformada Wavelet de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia) 77

Figura 7.15: Autocorrelación de Registro con transformada Wavelet de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia) 77

Figura 7.16: Registro con transformada Wavelet normalizada con ρmax de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia) 77

Figura 7.17: Registro original de transmisor en línea vista con receptor. (Elaboración propia) 78

Figura 7.18: Registro original con tranformada Wavelet de transmisor en línea vista con receptor. (Elaboración propia) 78

Figura 7.19: Autocorrelación de Registro original con tranformada Wavelet de transmisor en línea vista con receptor. (Elaboración propia) 78

Figura 7.20: Registro original con tranformada Wavelet normalizado con ρmax. (Elaboración propia) 78

Figura 7.21: Registro original de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia) 79

Figura 7.22: Registro original con transformada Wavelet de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia) 79

Figura 7.23: Autocorrelación de Registro original con transformada Wavelet de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia) 79

Figura 7.24: Registro original con transformada Wavelet normalizado con ρmax de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia) 79

Figura 7.25: Registro original de medición sin transmisión. (Elaboración propia) 80

Figura 7.26: Registro original con transformada Wavelet de medición sin transmisión. (Elaboración propia) 80

Figura 7.27: Autocorrelación de Registro original con transformada Wavelet de medición sin transmisión. (Elaboración propia) 80

Figura 7.28: Registro original con transformada Wavelet normalizado con ρmax de medición sin transmisión. (Elaboración propia) 81

Figura 7.33: Registro original base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010. (Elaboración propia) 82

Figura 7.34: Registro neto de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010. (Elaboración propia) 82

Figura 7.35: Registro neto de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 con transformada Wavelet. (Elaboración propia) 83

Figura 7.36: Registro neto de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 con transformada Wavelet normalizado con ρmax. (Elaboración propia) 83

Figura 7.37: Registro eje X de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 normalizado con ρmax. (Elaboración propia)..... 83

Figura 7.38: Registro eje Y de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 normalizado con ρmax. (Elaboración propia)..... 84

Figura 7.39: Registro eje Z de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 normalizado con ρmax. (Elaboración propia)..... 84

Figura 7.40: Registro neto de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia) .. 85

Figura 7.41: Registro neto con transformada Wavelet de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia) 85

Figura 7.42: Autocorrelación de registro neto con transformada Wavelet de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia)..... 85

Figura 7.43: Registro neto con transformada Wavelet normalizado con ρmax de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia)..... 85

Índice de tablas

Tabla 2.1: Características del Waspmote (Elaboración Propia)..... 31

Tabla 3.1: Características de Interfaces Inalámbricas del Waspmote [27] 33

Tabla 3.2: Tamaño Máximo de Trama por módulo. [32] 36

Tabla 4.1: Características de aplicaciones Web de USGS, JMA, CSN (Elaboración propia) 47

Índice de CD

Anexos

Códigos

Capítulo 1: Introducción y objetivos

1.1. Introducción

Las redes inalámbricas de sensores WSN (Wireless Sensor Networks) están ocupando un lugar importante en el diseño de sistemas preventivos de catástrofes o monitoreo de eventos, por su flexibilidad a la hora de implementarlas. Existen muchas aplicaciones que se les pueden dar, por ejemplo: minería, agricultura, biología, catástrofes naturales, etc. Pero estas últimas deberían ser las principales preocupaciones a la hora de implementar redes WSN, por la gran diferencia que se puede hacer cuando se tiene una preparación, incluso de pocos segundos antes del evento.

Estas redes suelen ser de bajo costo y de fácil implementación debido a sus características, como el uso de sensores MEMS (Microelectromechanical Systems) [1], procesadores de bajo costo, el uso de teléfonos inteligentes[2], entre otros. Dado lo anterior, esta investigación analiza la factibilidad de crear una red WSN para la detección, alerta y monitoreo de sismos de gran importancia. En Chile, la actividad sísmica ha aumentado en los últimos 100 años, como se puede apreciar en las figuras 1.1 y 1.2.[3]. Es por ello, que es necesario contar con mecanismos que puedan identificar y alertar con debida anticipación, así la población afectada puede prepararse.

Figura 1.1: Registro de Sismos en Chile entre 1901 y 1951 sobre 5 grados, Escala Richter. [3]

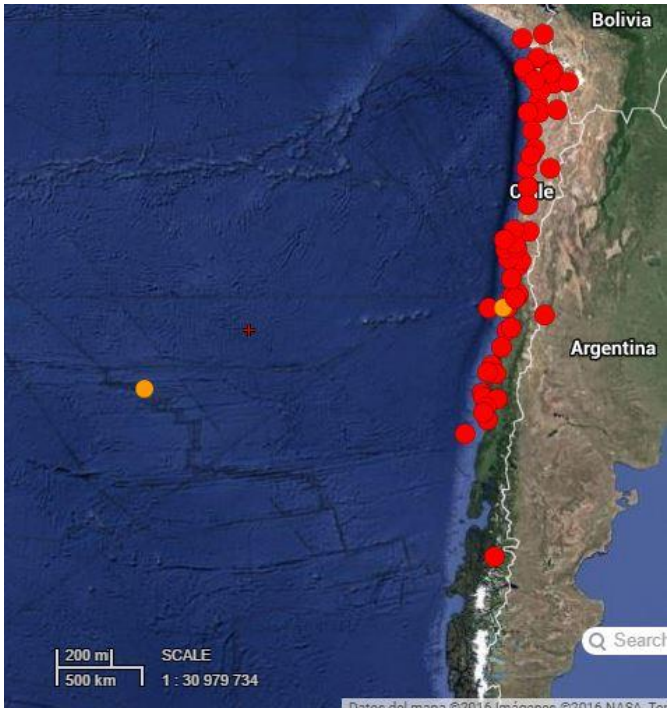


Figura 1.2: Registro de Sismos en Chile entre 1952 y 2016 sobre 5 grados, Escala Richter. [3]

1.2. Definición y contribuciones del proyecto

Este proyecto tiene la finalidad de desarrollar una red de sensores Libelium[4] para la detección de ondas sísmicas junto con la factibilidad de generar una alerta temprana preventiva y de preparación para un movimiento telúrico de magnitudes importantes. Además, se busca desarrollar una plataforma de caracterización de las ondas sísmicas producidas, con el fin de aportar a la investigación actual que existe en el país.

Uno de los principales problemas de las agencias sismológicas del mundo, es la colocación de sensores en lugares remotos y aislados, además del precio asociado. Lo importante de la colocación de estos sensores, es que permiten monitorear los eventos sísmicos de fallas tectónicas y posiblemente predecir el comportamiento y desplazamiento de las placas tectónicas. Por ello, desarrollar una red de sensores que sea posible ubicar en lugares remotos con bajos costos de mantención, es un problema abierto y que todavía no tiene una solución definitiva y eficiente.

La metodología a utilizar en este proyecto es basada en un modelo de prototipado ya que se cuenta con los nodos Libelium para su prueba y adaptabilidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

- Desarrollar una red escalable de nodos de la plataforma Libelium® para la obtención y transmisión inalámbrica de datos de origen sísmico en forma eficiente a un centro de procesamiento distante.

- Elaborar programa de procesamiento de la información recibida para el reconocimiento, recolección y almacenamiento de datos de ondas sísmicas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar y estudiar la factibilidad que tienen las tecnologías de transmisión presentes en la plataforma Libelium® para la implementación de una red de nodos capaz de obtener una oportuna y eficiente transmisión de datos sísmicos.

- Realizar programa para analizar la tasa de muestreo máxima alcanzable para la detección de eventos sísmicos mediante el acelerómetro 3D (Tres dimensiones) de la plataforma Libelium® de WSN en distintas tecnologías de transmisión.

- Diseñar y programar una solución para la alerta temprana de eventos sísmicos basada en WSN, considerando desarrollos reportados en literatura especializada.

- Desarrollar programa para la caracterización de los datos sísmicos almacenados en la base de datos y confeccionar una página web donde se aprecie de forma gráfica el análisis.

1.4. Organización del documento

En la presente sección se describe brevemente el contenido de cada capítulo.

CAPITULO I: Introducción y objetivos.

Se introduce el tema de memoria y se describen los objetivos generales y específicos.

CAPITULO II: Estado del arte.

Se mencionan trabajos relacionados con la investigación. Además, se desarrollan las características de las redes inalámbricas y de los nodos Libelium que se utilizan en este proyecto. Finalmente, se describe el proceso de caracterización de un evento sísmico basado en su aceleración y las formas que existen de filtrar la información obtenida eliminando el ruido producido por los instrumentos de medición y del canal.

CAPITULO III: Transmisión inalámbrica mediante sensores Libelium.

Se describe el proceso de programación de los nodos Libelium para la transmisión mediante los protocolos Zigbee y GPRS, además de la comparación y la justificación de utilizar estas tecnologías.

CAPITULO IV: Programación de una aplicación web para recolección de datos sísmicos.

Se describe el desarrollo de una aplicación web, basada en el diseño lógico centrado en el usuario, que tiene como objetivo la recolección de la información transmitida, su procesamiento, alerta y caracterización.

CAPITULO V: Procesamiento de la información para generar una alerta temprana.

Se describen las consideraciones que debe tener la WSN para generar una alerta temprana efectiva.

CAPITULO VI: Procesamiento de la información para la caracterización de ondas sísmicas.

Se describen las caracteristicas que pueden obtenerse de la WSN, su procesamiento y almacenamiento. Se determina si es posible la comparación de ondas sísmicas que permitan entregar información para el futuro de la sismología.

CAPITULO VII: Presentación y análisis de resultados.

Se presentan los resultados del trabajo y describe la red a nivel de laboratorio.

CAPITULO VIII: Conclusiones.

Se presentan las conclusions del proyecto, recomendaciones y trabajos futuros.

Capítulo 2: Estado del arte.

2.1. Utilización de WSN en la detección de sismos.

En la actualidad se han desarrollado algunas WSN para la detección de eventos sísmicos, entre ellas, redes basadas en Smartphones y la propuesta por la JMA (Japan Meteorological Agency), la cual es analizada y sirve de base para la creación de una WSN con características similares en Chile. Además, existen algunos desarrollos e investigaciones en torno al monitoreo de Volcanes, los cuales generan movimientos sísmicos producto de su actividad. A continuación, se presentan ambas redes.

2.1.1. Sistema de alerta temprana de sismos de Japón.

En la actualidad, el sistema de alerta temprana EEW (Earthquake Early Warning) más conocido y que ha dado resultados, es la propuesta por la JMA[5]. Este sistema cuenta con más de 4235 sismómetros instalados a través del país y está coordinado con los canales de televisión, redes telefónicas y radioemisoras para la generación de la alerta. La alerta se produce cuando se detecta un sismo mayor a 5 grados en la escala sísmica de la JMA y se deduce de la amplitud de las ondas P y S[6]. Aún así, si el receptor de la alerta se encuentra muy cerca del epicentro no es efectiva dado que el movimiento fuerte viene delante de cualquier aviso.

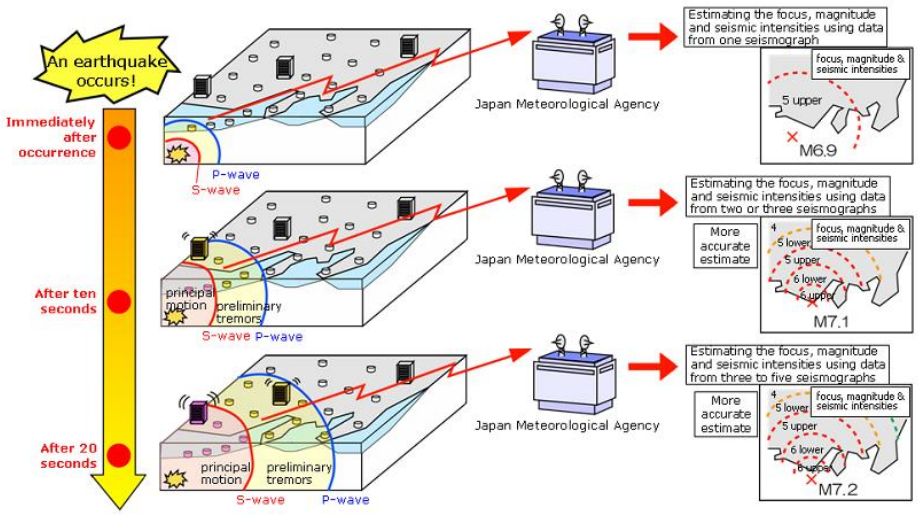


Figura 2.1: Representación del sistema EEW de JMA[7].

2.1.2. Sistema de monitoreo de sismos volcánicos.

Predecir sismos productos de la actividad volcánica es importante cuando existe población aledaña o existencia de minerales y trabajo de extracción. La detección temprana juega un rol importante, aunque sean unos cuantos segundos, ya que permitiría la preparación y la evacuación si fuese necesaria. Pero también es importante la fiabilidad de estos sistemas, ya que deben garantizar una buena confiabilidad, una alerta no puede emitirse por error, esto podría significar pérdidas importantes si fuese una empresa o pánico no justificado en caso de población civil.

El primer monitoreo de volcanes usando WSN fue en el año 2004 en el Volcán Tungurahua, Ecuador[8], donde se emplean 3 sensores acústicos y se detectan señales infrasónicas sincronizadas mediante GPS (Global Positioning System), estas mediciones son transmitidas a un laboratorio ubicado a 9 [km] y se consiguen 54 horas de medición. Dado los avances obtenidos por la investigación anterior, el año 2005 se realiza un segundo monitoreo, pero esta vez se cuenta con 16 sensores sismo-acústicos durante 19 días y con transmisión a una estación base a 9 [km][9] donde se implementa el algoritmo STA/LTA (Short Time Average over Long Time Average)[10] para optimizar el consumo de energía y transmisión, la sincronización también se hace mediante GPS y se utiliza el protocolo FTSP (Flooding Time Synchronization Protocol). Dado el comportamiento irregular de los protocolos y resultados inconsistentes, se desarrolla el framework LANCE[11] el cual es utilizado el año 2007 en el mismo volcán con 8 sensores durante 71 horas, esta vez con un 80% de transmisión efectiva. El año 2008 se desarrolla un proyecto llamado OASIS que cuenta con 16 nodos alrededor del volcán Mount St. Helens, Estados Unidos[12] y que tiene la finalidad de recolectar información en tiempo real. El año 2009 se desarrolla un nuevo proyecto en el volcán Mount St. Helens que cuenta con sensores de luminosidad e infrasonido que son lanzados desde el aire, lo más cerca del cráter[13].

Se puede apreciar que las WSN son prometedoras a la hora del monitoreo y la alerta temprana pero también se debe considerar el costo de implementación. Si bien los sismómetros tienen una excelente precisión y son los que asignan una magnitud a un movimiento sísmico, tienen un alto costo en el mercado[14]. Los sensores acústicos tienen un menor costo, pero tampoco pueden dar una solución por si solos. Es en este punto donde los investigadores recurren a la utilización de acelerómetros, los que tienen un bajo costo y una buena respuesta. La primera aproximación de la detección en tiempo real y la utilización de WSN basadas en acelerómetros, es la investigación en el volcán Cotopaxi, Ecuador[15].

Si bien la utilización de acelerómetros en una WSN puede disminuir el costo de su implementación y abrir la posibilidad de utilizar un mayor número de sensores para generar una respuesta más confiable, también hay que considerar las distancias de los enlaces, tanto entre ellos y el concentrador. En esta investigación se utilizan 16 Motes, 10 MICAz y 6 IRIS a una altura de 4870 [m] durante 3 días con una transmisión por Wi-Fi a una distancia de 40 [km] del laboratorio de procesamiento. Además, el procesamiento no logra generar una alerta temprana, debida a su retardo.

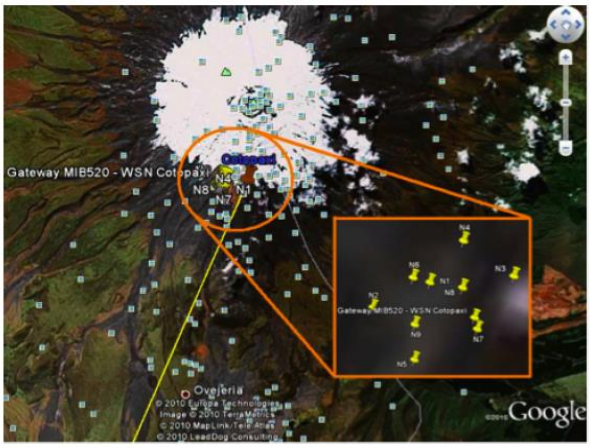


Figura 2.2: Nodos en Volcán Cotopaxi[15].

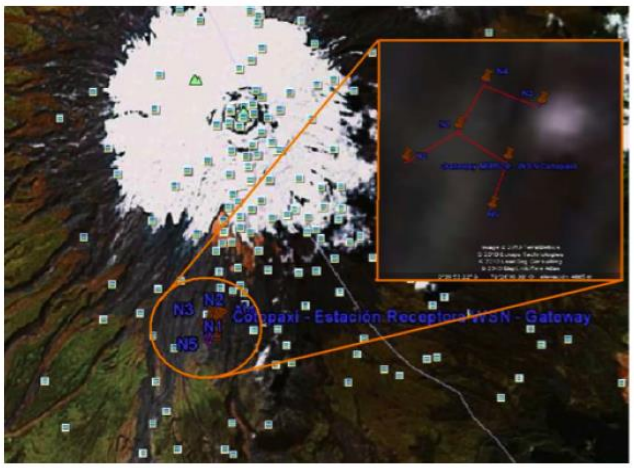


Figura 2.3: Estaciones Receptoras en Volcán Cotopaxi[15].

2.1.3. Sistema distribuido de detección de sismos usando una red de sensores inalámbrica para alerta temprana.

Un grupo del departamento de comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia propuso una WSN basada en smartphones (SPs)[2]. A diferencia del proyecto Finazzi[16], el cual usa SPs para obtener datos cuando se supere un umbral fijo y posteriormente envía un "vibration event" al servidor de análisis, esta propuesta distribuida permite que la información sea previamente procesada por cada SP antes de ser enviada al servidor; permitiendo optimizar el consumo de batería móvil y aprovechar las ventajas implícitas en una arquitectura distribuida.

La arquitectura del sistema propuesto sigue un modelo jerárquico y está compuesta por tres niveles. El primer nivel es básicamente una red de sensores de SPs que obtienen la información a procesar; el segundo, compuesto por ordenadores con los recursos necesarios, tanto hardware y software, llamados ISs (Servidores Intermedios), que reciben y envían información a todos los SPs que se encuentren en su rango de cobertura; y por último el nivel 3, correspondiente al CC (Centro de Control), que mantiene una visión global, certera y actualizada de la situación, siendo el responsable de organizar y ordenar toda la arquitectura con una gestión eficiente de recursos.

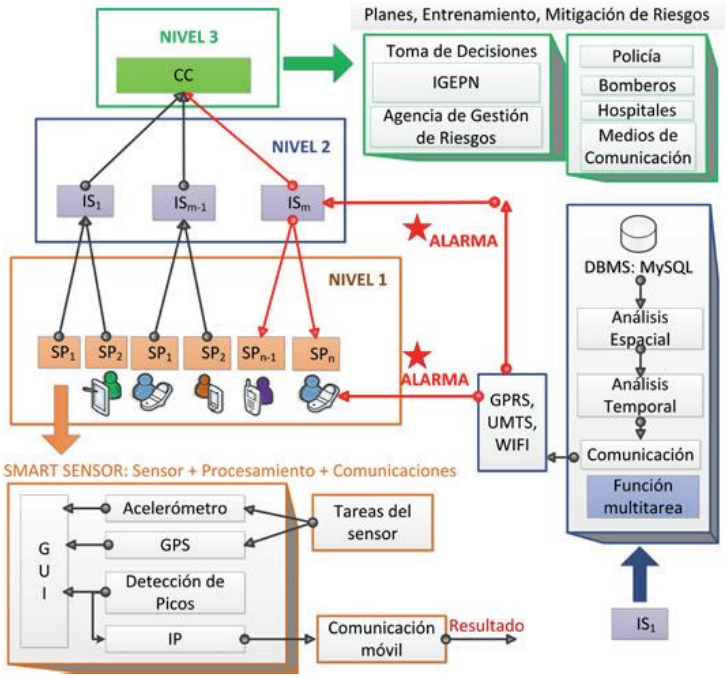


Figura 2.4: Arquitectura en 3 niveles: Nivel 1 - Red de smartphones, Nivel 2 - Servidores intermedios - Nivel 3: Centro de control y toma de decisiones.[2]

Cada SP cuenta en su interior con un acelerograma, éste mide los cambios de aceleración en cada eje [x, y, z] y para obtener la aceleración neta usan Pitágoras sin olvidar la aceleración de la gravedad G, como se señala en la siguiente figura:

$$a = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - g \qquad , g = 980 gals \quad (1)$$

Figura 2.5: Ecuación de aceleración neta[2].

Habiendo obtenido la aceleración total para un instante de tiempo determinado, se debe tener en cuenta la repercusión que el ruido tiene sobre este acelerograma; de esta manera se define un acelerograma como la unión de la señal sísmica y ruido en función del tiempo. Se usa la transformada discreta de Fourier (DFT) para cambiar del domino del tiempo al de la frecuencia, el cual permite aplicar filtros pasa-bajos para eliminar las altas frecuencias que corresponden al ruido que afecta directamente a los niveles máximos de la señal.

Aunque existen otros filtros usados en sismología, la DFT por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT), es de las más usadas por su facilidad y reducción de cálculo al poder ser representada de forma matricial que simplifica incluso su programación.

Posteriormente se usa STA/LTA[17] por su gran uso en sismología en la detección de eventos; su sencillez otorga una gran ligereza y poca cantidad de cálculo permitiendo ahorrar energía contribuyendo al éxito global del sistema, e incluso siendo usados en otros ámbitos.

A continuación, si el algoritmo STA/LTA detecta que ha existido un peak, la aplicación accede al sensor GPS para obtener la localización actual del usuario, que es necesaria para una validación realizada en el IS. En el caso en que la aplicación no logré conseguir la ubicación del usuario, la muestra no será enviada al IS.

En la siguiente figura se aprecia el proceso completo de detección de un valor máximo en un SP, donde se observa que para comunicar la alerta se aprovecha los tipos de conexiones con las que puede contar un SP como GPRS, UMTS, WiFi, etc.

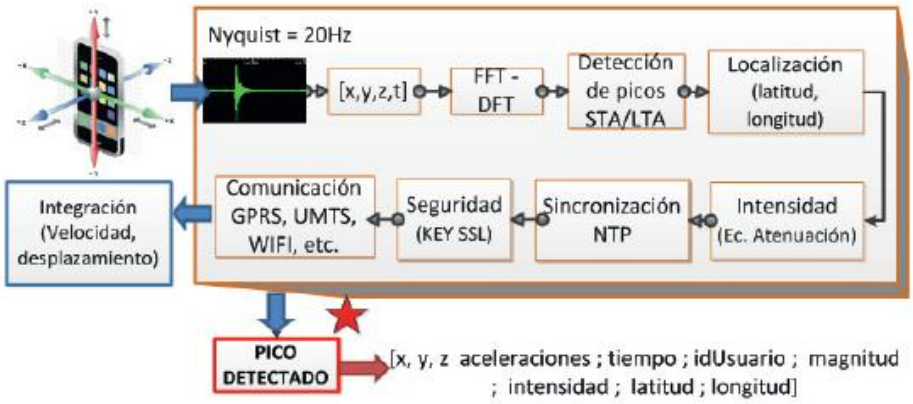


Figura 2.6: Proceso de detección de valor máximo en un SmartPhone.

También es importante notar que se considera el Teorema de Nyquist, que dice que la frecuencia de muestreo debe ser el doble que la máxima frecuencia contenida en la señal.

2.1.4. Red de alerta temprana de terremotos basada en celulares instalada en Chile por USGS.

El proyecto es una colaboración entre investigadores del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y el Centro Sismológico Nacional (CSN) de la Universidad de Chile, y contempla la instalación de una red sismológica de baja complejidad y costo, compuesta por 300 teléfonos celulares, de los cuales 9 están en proceso de instalación[18].

Dispositivos comunes de consumo, como los teléfonos inteligentes contienen versiones de bajo costo de los sensores utilizados en la detección de sismos, como GPS y acelerómetros. Estos aparatos si bien son menos precisos que los instrumentos científicos están presentes alrededor del mundo y de forma masiva en muchos lugares.

La primera parte de este proyecto conjunto se realizará a través de pruebas con una red de 300 aparatos instalada en Chile.

Esta red de celulares permitirá monitorear los datos con la finalidad de analizarlos y encontrar un algoritmo que sea apropiado para saber cuándo emitir la alerta.

En una segunda etapa del proyecto se espera que el sistema sea colaborativo (crowdsourcing), en donde cada persona pueda descargar una aplicación para que su smarthphone sea un aparato más de una red masiva.

La red de estaciones que se está instalando está compuesta por un Smartphone conectado a internet y a una fuente de poder, al que se le añadió un dispositivo adicional con un segundo chip que entrega datos de posición (GPS) más precisos.

Figura 2.7: SmartPhone instalado en Santiago, CSN.[19]

2.2 Caracterización de un evento sísmico.

Los movimientos sísmicos tienen una frecuencia que varía entre 1 y 20 [Hz] [20] y según el criterio de Nyquist, se necesita un muestreo 2 veces mayor que la frecuencia máxima para poder posteriormente reconstruir la señal a partir de las muestras, sin error. Además, es necesario tener considerado el tiempo de procesamiento, el tiempo de respuesta, la presencia de ruido y la frecuencia de corte del sensor[21].

Como se menciona anteriormente, el monitoreo de eventos sísmicos en tiempo real debe tener una calidad de servicio que minimice los falsos positivos. Es decir, se debe considerar los siguientes factores: Disponibilidad, tiempo de respuesta, retardos, transmisión efectiva de información, capacidad de ancho de banda y el consumo de energía. A continuación, se describen algunas formas de caracterización que son utilizadas en esta investigación.

2.2.1 Caracterización de un evento volcano-tectónico.

Para poder caracterizar un evento volcano-tectónico, como se realiza en el volcán Cotopaxi[20], se debe tener en cuenta que las señales sísmicas son fenómenos considerados como procesos estocásticos o aleatorios. Sin embargo, se pueden considerar como procesos localmente estacionarios si su análisis se hace mediante ventanas de observación[22]. Es por esta razón que se utilizan ventanas deslizantes a lo largo del registro con una longitud que debe ser lo suficientemente corta para asegurar estacionariedad local, pero no tan corta para no afectar a la fiabilidad de los estimadores[23]. Es importante destacar que existe un solapamiento que puede afectar a la velocidad del procesamiento y la veracidad de los datos. Con el fin de obtener un buen resultado, en la investigación se lleva a cabo un solapamiento igual a 1 en una ventana N=512 de un total de 120.000 muestras[23].

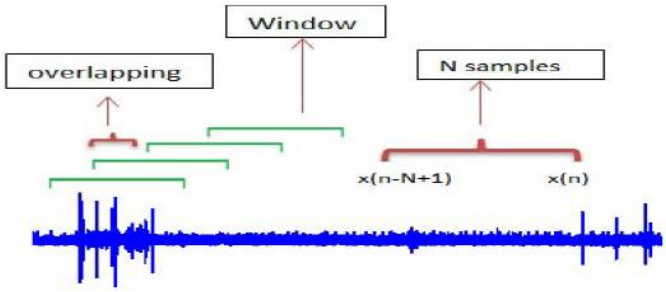


Figura 2.8: Definición de ventanas de observación y superposición.[23]

Como se busca obtener una varación importante en el registro que permita identificar un evento sísmico importante, se utiliza la función de autocorrelación en la ventana, pero para que el cálculo sea más fácil de procesar, se extrae el valor medio de cada ventana. Una vez realizado lo anterior, se calcula la función de autocorrelación con atraso r(k), donde r(0) corresponde a la potencia promedio de la señal.

$$r(k)_{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^{n-N+1} y(i)y(i-k),$$
$$0 \leq k \leq N-1$$

Figura 2.9: Función de autocorrelación r(k) donde k representa el atraso, N representa el número de muestras por ventana y n corresponde a la ventana deslizante[20].

Los valores r(0) y r(1) permiten calcular un coeficiente normalizado de correlación denominado ρ1.

$$\rho_{1_u} = \frac{r(1)_u}{r(o)_u}$$
$$u = \{1,2,3 \ldots\ldots N_{ventanas_{total}}\}$$

Figura 2.10: Función de autocorrelación normalizada ρ1[20]

Existen dos normalizaciones que se derivan de la mencionada anteriormente. La normalización en línea mínima, que relaciona r(1) de una determinada ventana con el valor mínimo de todos los parámetros r(0); y la normalización en línea máxima, que relaciona r(1) de una determinada ventana con el valor máximo de todos los parámetros r(0). Éstas entregan una señal que permite identificar de mejor forma la ubicación de la Onda P y disminuyen el ruido instrumental.

2.3 Selección y adquisición de una plataforma WSN

Una vez identificada las características de las ondas sísmicas, los métodos empleados para medirlas y algunos proyectos que ilustran cómo monitorearlas, es necesario identificar el tipo de plataforma que se debe realizar para cumplir con los objetivos de esta investigación[24]. Son mencionadas las características que debe tener la plataforma que se adecúan a las necesidades, estas son: Escalabilidad, posibilidad de desarrollo, versatilidad, Robustez, Tecnología de Punta, Documentación, Posibilidad de conexión con muchos tipos de sensores. Junto con lo anterior, debe cumplir con tecnologías que permiten la comunicación inalámbrica como: WiFi, Bluetooth, Zigbee, GPRS, entre otras.

Los nodos que cumplen de mejor forma con los requerimientos anteriores pertenecen a la empresa Libelium dado que poseen acelerómetros integrados, cuenta con certificaciones ISO, ofrecen buenas alternativas tecnológicas y excelente asesoría en la cotización de productos.

Los nodos, desde ahora llamados Waspmote tienen las siguientes características[25]:

Tabla 2.1: Características del Waspmote (Elaboración Propia)

Microcontrolador:	ATMega1281
Frecuencia del procesador:	14.7456 [MHz]
SRAM:	8 [KB]
EEPROM:	4 [KB]
FLASH:	128 [KB]
CLOCK:	RTC 32 [KHz]
Acelerómetro:	±2g/±4g/±8g

Figura 2.11: Waspmote Libelium[25]

El Acelerómetro, modelo LIS331DLH[26], incorporado en el Waspmote mide la aceleración en los 3 ejes físicos (x, y, z) como indica la siguiente figura:

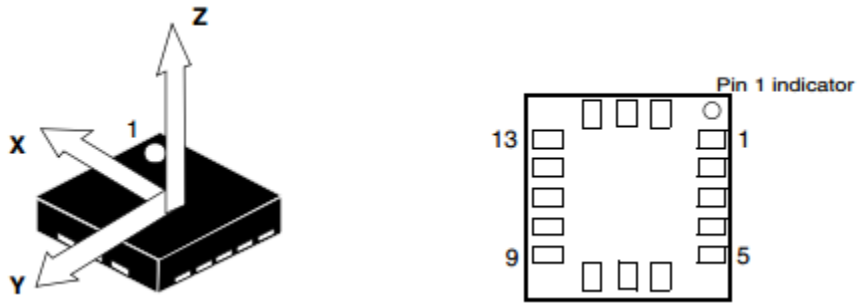


Figura 2.12: Movimiento en 3D (Izquierda), Terminales de Aceler´metro (Derecha)[26]

Además, se debe considerar los distintos modos de energía para que sea capaz de detectar las ondas sísmicas según los objetivos de la investigación. La velocidad de transmisión debe ser lo suficientemente grande para la precisión en la detección, el acelerómetro tiene una velocidad máxima de 1000 [Hz] pero hay que considerar que también depende de la velocidad del procesador del Waspmote.

Capítulo 3: Transmisión inalámbrica mediante sensores Libelium.

Los Waspmote Libelium son dispositivos especialmente orientados para desarrolladores y diseñados para ser de bajo consumo. Trabajan con distintos protocolos y frecuencias. Además, pueden llegar a incluir 17 diferentes interfaces inalámbricas, entre ellas Zigbee (802.15.4), WiFi (802.11), GPRS (2.5G), tecnologías disponibles para esta investigación.

En la siguiente figura se muestran las características técnicas de las diferentes interfaces inalámbricas disponibles para un Waspmote Libelium:

Tabla 3.1: Características de Interfaces Inalámbricas del Waspmote [27]

Model	Protocol	Frequency	txPower	Sensitivity	Range *
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.4GHz	100mW	-100dBm	7000m
XBee-ZB-Pro	ZigBee-Pro	2.4GHz	50mW	-102dBm	7000m
XBee-868	RF	868MHz	315mW	-112dBm	12km
XBee-900	RF	900MHz	50mW	-100dBm	10Km
LoRaWAN	LoRaWAN	868, 900 and 433 MHz bands	up to 18.5 dBm	-136dBm	- km - Typical base station range
LoRa	RF	868 and 900 MHz	14 dBm	-137dBm	21+Km
Sigfox	Sigfox	868MHz	14 dBm	-126dBm	- km - Typical base station range
WiFi	802.11b/g	2.4GHz	0dBm - 12dBm	-83dBm	50m-500m
GPRS Pro and GPRS+GPS	-	850MHz/900MHz/ 1800MHz/1900MHz	2W(Class4) 850MHz/900MHz, 1W(Class1) 1800MHz/1900MHz	-109dBm	- Km - Typical carrier range
3G/GPRS	-	Europe version: Dual-band UMTS, tri-band GSM/GPRS/EDGE America/Australia version: Dual-Band: UMTS, quad-Band GSM/ GPRS/EDGE	UMTS 0.25 W, GSM 2 W, DCS/PCS 1 W	-106dBm	- Km - Typical carrier range
Bluetooth Low Energy	Bluetooth v.4.0 / Bluetooth Smart	2.4GHz	3dBm	-103dBm	100m

** Line of sight, Fresnel zone clearance and 5dBi dipole antenna.*

Al analizar la tabla anterior y considerando que para la investigación se cuenta solo con módulos de las tecnologías WiFi, Zigbee y GPRS, se descarta la primera principalmente por su rango de alcance, ya que WiFi complica la idea de alerta temprana y se necesitarían muchos más nodos para cubrir la zona de monitoreo de

sismos, por otro lado, el protocolo que utiliza es más complejo comparado con Zigbee.

3.1. Programación del nodo Libelium para transmisión mediante Zigbee.

Para la transmisión por medio de Zigbee, se debe instalar un módulo Zigbee al Waspmote como el mostrado a continuación:

Figura 3.1: Módulo Zigbee. [28]

Libelium ofrece un entorno de desarrollo para la programación de sus waspmote en basado en lenguaje C++, llamado Waspmote Pro IDE (Integrated Development Environment)[29] y que mediante puerto Serial se carga cada programa que se realiza. También cuenta con varios ejemplos para conocer la programación que se debe tener para acceder a las distintas utilidades del mote, entre ellas: códigos para el acelerómetro, sensores básicos, interruptores, USB (Universal Serial Bus), comunicación, etc.[30]. Además para monitorear la transmisión y conexión de los módulos Zigbee, se utiliza el software XCTU perteneciente a la empresa Digi® [31].

Dentro del entorno de desarrollo se presenta una sección para programar llamada Sketch, la cual contiene 2 partes principales, una de ellas es el Setup, donde principalmente se encienden los sensores o cada componente del waspmote a usar, y la otra es el Loop, donde se programa lo que se quiere que el waspmote haga cíclicamente.

```
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:

}


void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:

}
```

Figura 3.2: Sketch del entorno de desarrollo. (Elaboración Propia)

Para esta investigación lo importante es transmitir la aceleración neta y su tiempo respectivo medido por el waspmote. A continuación, se aprecia parte del código necesario que se incluye en el loop para obtener lo dicho:

```
float neto;
float tiempo;

byte check = ACC.check();

//----------X Value-----------------------
int x_acc = ACC.getX();

//----------Y Value-----------------------
int y_acc = ACC.getY();

//----------Z Value-----------------------
int z_acc = ACC.getZ();
z_acc = z_acc - 980;

neto= sqrt(pow(x_acc,2)+pow(y_acc,2)+pow(z_acc,2));
tiempo= millis()-previous;
```

Figura 3.3: Código para obtener aceleración neta y su respectivo tiempo. (Elaboración Propia)

Como se puede notar en el código, para obtener la aceleración neta se usa la fórmula indicada anteriormente en el estado del arte, específicamente en el proyecto de WSN mediante SmartPhones del grupo de la Universidad Politécnica de Valencia[2], pero se considera que el valor de la fuerza de gravedad G se debe restar a la aceleración del eje Z y no a la aceleración neta.

Una vez obtenidos los datos, éstos deben ser encapsulados en paquetes, desde ahora llamados Tramas, ya que de esta forma se maximiza la tasa de transmisión, esto implica que se pueden enviar muchos más datos al mismo tiempo. En la tabla siguiente se indica el tamaño máximo en Bytes que permite empaquetar el Trama, según cada tecnología.

Tabla 3.2: Tamaño Máximo de Trama por módulo. [32]

Module			Maximum frame size
XBee – 802.15.4	Link Encrypted	@16bit Unicast	98 Bytes
		@64bit Unicast	94 Bytes
		Broadcast	95 Bytes
	Link Unencrypted		100 Bytes
XBee – 868			100 Bytes
XBee – 900	Link Encrypted		80 Bytes
	Link Unencrypted		100 Bytes
XBee - Digimesh			73 Bytes
XBee - ZigBee	Link Encrypted	@64bit Unicast	66 Bytes
		Broadcast	84 Bytes
	Link Unencrypted	@64bit Unicast	74 Bytes
		Broadcast	92 Bytes
Bluetooth – transparent connection			Limited by MAX_FRAME
GPRS			Limited by MAX_FRAME
3G			Limited by MAX_FRAME
LoRa / SX1272			Limited by MAX_FRAME
WiFi			Limited by MAX_FRAME

Se puede observar que el tamaño máximo que se permite en una transmisión de datos sin encriptar y por Broadcast mediante Zigbee es de 92 [Bytes]. Dado que ninguna trama de la librería del Waspmote se adapta a la utilización eficiente de los Bytes para empaquetar la aceleración neta y su tiempo, se opta por crear y agregar un nuevo tipo de Trama a la tabla de Tramas que contienen las librerías WaspFrame.h y WaspFrameConstants.h (Ver en CD Anexo). El tag que llama a la nueva trama creada en las librerías es “SENSOR_ACC_NETO_TIME”. A continuación se indica parte del código para encapsular los datos:

```
// create new frame
frame.createFrame(ASCII);
frame.setFrameSize(ZIGBEE, BROADCAST, DISABLED, DISABLED);
// add frame fields
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME,neto,tiempo);
```

Figura 3.4: Código para empaquetar los datos. (Elaboración Propia)

Se puede apreciar que al momento de agregar campos a la trama, se llama según el tag, seguido por los datos que se quieren empaquetar. Para el caso de Zigbee y su cantidad de bytes, se logran agregar 4 sensores, es decir, se logra realizar 4 veces "frame.addSensor( )" antes de llenar los 96 [bytes] permitidos.

Ya encapsulados los datos, solo queda transmitirlos vía zigbee, lo que se representa a continuación con parte del código:

```
// send XBee packet
xbeeZB.send( RX_ADDRESS, frame.buffer, frame.length );
```

Figura 3.5: Código para hacer envío de Tramas mediante Zigbee. (Elaboración Propia)

Donde RX_ADDRESS corresponde a la dirección MAC de destino. La idea sería tener waspmotes transmisores que envíen información a un coordinador, quien se encargaría de transmitir los datos recibidos a una web que procese los datos y a una base de datos para almacenarlos, dicha red sería como la mostrada en la siguiente figura:

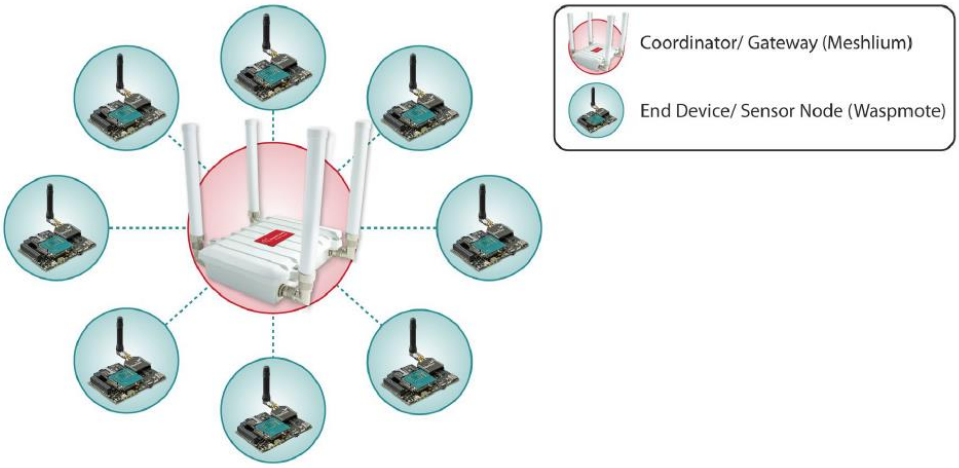


Figura 3.6: WSN con topología estrella.[28]

Para esta investigación no se cuenta con el Meshlium o coordinador, sino que con un Gateway de prueba, quien se encarga que haya comunicación entre el emisor y el receptor. Se usa como receptor otro waspmote, quien junto al Gateway simulan al Meshlium, por lo cual éste se programa para la recepción de las tramas, quedando una red como la siguiente:

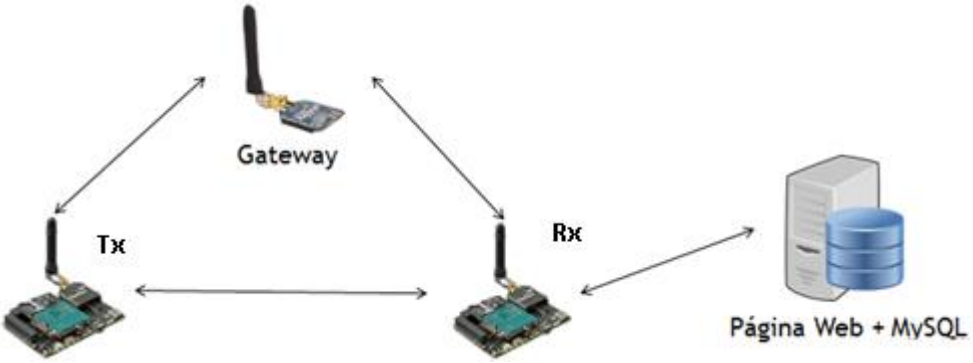


Figura 3.7: Red Zigbee para la investigación. (Elaboración Propia)

En esta investigación se realiza esta red a modo de prueba, para medir la tasa de transmisión que se consigue por medio de una red Zigbee de este tipo, ya que para el objetivo de este proyecto se necesita obtener una tasa de muestreo superior o igual al doble de la frecuencia común de un sismo, para así poder tener una buena reconstrucción de la señal medida (Teorema de Nyquist).

Para verificar que hay conexión en la red implementada y para conocer la dirección MAC a la cual enviar las tramas, se hace uso del programa XCTU mencionado anteriormente. El resultado de las transmisiones se ilustra a continuación, donde la calidad de la conexión se calific en un rango de 0 y 255, donde 0 es una mala conexión y 255 es una buena conexión.

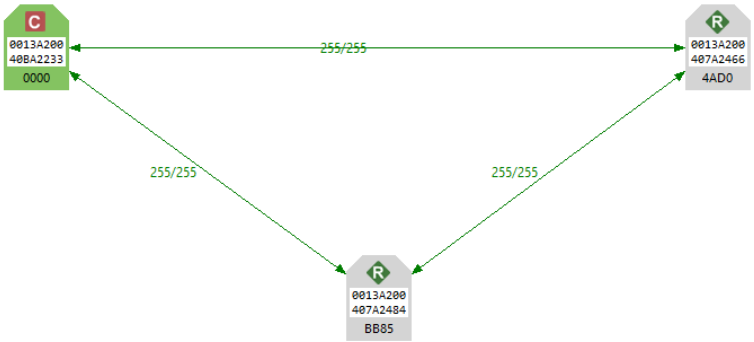


Figura 3.8: Prueba de conexión mediante XCTU. (Elaboración Propia)

Las tramas que llegan al receptor son impresas por puerto serial, del cual se extrae la información mediante un computador, el cual cumple la función de enviarla a una base de datos.

En la siguiente figura se aprecia la línea de código con la que se lee la trama recibido y que posteriormente se imprime por puerto Serial:

```
USB.println( xbeeZB._payload, xbeeZB._length);
```

Figura 3.9: Código para imprimir por Serial el trama recibido por Zigbee. (Elaboración Propia)

Lo que se imprime por puerto serial puede ser visto por la opción llamada "Monitor serial" que viene incluida en el Waspmote Pro IDE. Lo mostrado por esta herramienta se observa en la siguiente ilustración:

```
D#

Joined a network!
operating 16-b PAN ID: D519
operating 64-b PAN ID: 61F9D92A815822FC
channel: 16
<=>□□#382549469#node_07#125#:83;96500#:87;96506#:87;96510#:87;96515#
<=>□□#382549469#node_07#126#:77;96601#:77;96607#:77;96611#:77;96616#
<=>□□#382549469#node_07#127#:84;96709#:84;96715#:91;96719#:91;96724#
<=>□□#382549469#node_07#128#:82;96810#:80;96816#:80;96820#:80;96825#
<=>□□#382549469#node_07#129#:86;96911#:88;96917#:88;96921#:88;96927#
<=>□□#382549469#node_07#130#:86;97012#:86;97017#:86;97022#:76;97027#
<=>□□#382549469#node_07#131#:86;97120#:92;97125#:92;97129#:92;97135#
<=>□□#382549469#node_07#132#:82;97224#:82;97229#:82;97234#:81;97238#
<=>□□#382549469#node_07#133#:82;97326#:82;97330#:76;97335#:76;97340#
<=>□□#382549469#node_07#134#:82;97545#:90;97550#:90;97555#:90;97559#
<=>□□#382549469#node_07#135#:91;97646#:91;97651#:91;97656#:91;97661#
```

Figura 3.10: Respuesta de Monitor Serial del Waspmote PRO IDE. (Elaboración Propia)

Ya transmitidos los datos, solo queda leer las tramas recibidas y procesarlos para obtener tanto la aceleración y su respectivo tiempo, trabajo que le corresponde al computador en el caso de esta investigación, pero una idea a futuro sería que el servidor web haga tal procesamiento y para eso se necesitaría contar con el coordinador o Meshlium en la red.

Los códigos completos tanto del waspmote emisor como del waspmote receptor se pueden encontrar en el CD Anexo.

3.2. Programación del nodo Libelium para transmisión mediante GPRS.

Para hacer uso de la transmisión por medio de GPRS en el Waspmote, es necesario instalar un módulo GPRS como el mostrado en la siguiente figura:

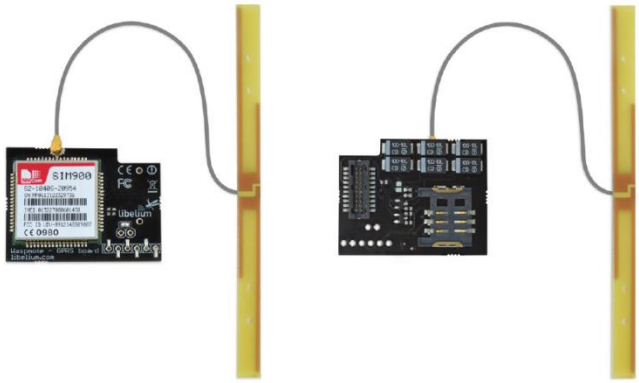


Figura 3.11: Módulo GPRS.[33]

Luego, en la parte del Setup del Sketch del entorno de desarrollo se debe encender y asignar el módulo GPRS con los parámetros respectivos al operador de la SIM (Subscriber Identity Module)[33] instalada en el módulo.

Para obtener los datos a transmitir, es decir, aceleración neta y su tiempo respectivo, se hace uso del mismo método mostrado anteriormente en Zigbee. Luego de obtener la información, se debe empaquetar para enviarla mediante tramas, de igual forma se usa la trama creada con el tag SENSOR_ACC_NETO_TIME, la diferencia es que en el caso de GPRS la cantidad de bytes para enviar es mayor comparada con la de Zigbee, ver tabla 3.2. Para GPRS la cantidad de as está definida por el MAX_FRAME (150 bytes). Esto quiere decir que la cantidad de datos que se permiten enviar es mucho mayor en una trama enviada por GPRS. En la siguiente figura se muestra parte del código con lo mencionado:

```
for(int i=0;i<10;i++){
  //----------Check Register-----------------------
  // should always answer 0x32, it is used to check
  // the proper functionality of the accelerometer
  byte check = ACC.check();
  //----------X Value-----------------------
  int x_acc = ACC.getX();
  //----------Y Value-----------------------
  int y_acc = ACC.getY();
  //----------Z Value-----------------------
  int z_acc = ACC.getZ();
  z_acc = z_acc - 980;

  neto[i]= sqrt(pow(x_acc,2)+pow(y_acc,2)+pow(z_acc,2));
  tiempo[i]= millis()-previous;
}
// Create new frame (ASCII)
frame.createFrame(ASCII);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[0], tiempo[0]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[1], tiempo[1]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[2], tiempo[2]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[3], tiempo[3]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[4], tiempo[4]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[5], tiempo[5]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[6], tiempo[6]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[7], tiempo[7]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[8], tiempo[8]);
frame.addSensor(SENSOR_ACC_NETO_TIME, neto[9], tiempo[9]);
```

Figura 3.12: Código para obtener datos y agregarlos a laTrama. (Elaboración Propia)

Como se vio anteriormente, en Zigbee se logran introducir 4 veces "frame.addSensor()", pero como se puede ver en la figura 3.8 para el caso de GPRS se pueden agrupar hasta 10, porque la cantidad de bytes permitidos en una trama en GPRS es mayor a Zigbee.

Después de tener empaquetados, tanto la aceleración como el tiempo, se debe enviar por GPRS la información. Para esta investigación, se decide enviar por método GET a una URL (Uniform Resource Locator) cada trama, código que se basa en el ejemplo que viene de GPRS en el Waspmote PRO IDE llamado GPRS_19b_Reading_URL_with_GET_and_frame[32]. En la siguiente figura se muestra la línea de código que envía la información a una URL por método GET:

```
// 6. gets URL from the solicited URL
answer = GPRS_Pro.readURL(URL, frame.buffer, frame.length, 1, GET);
```

Figura 3.13: Envío de trama mediante método GET a una URL

Posteriormente, en la URL se ejecuta un código PHP que procesa la información recibida y la envía a una base de datos. Por lo cual, la red queda de la siguiente forma para esta investigación:

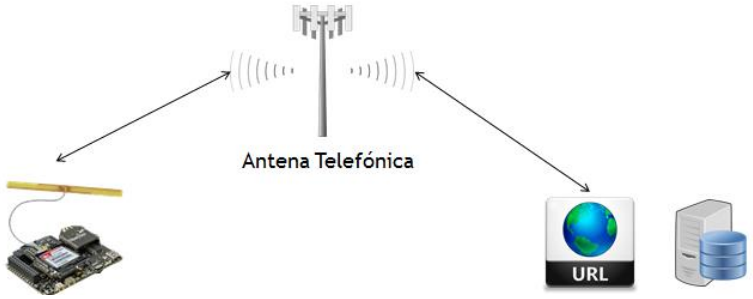


Figura 3.14: Red GPRS creada para la investigación. (Elaboración propia)

Capítulo 4: Programación de una aplicación web para recolección de datos sísmicos.

La metodología que se utiliza para progamar una aplicación web que despliegue los datos de ondas sísmicas es centrada en el usuario. Esto quiere decir que existen 6 procedimientos que deben realizarse, cada uno depende del anterior:

(1) Desarrollo del concepto de la aplicación web.
(2) Investigación y análisis de requerimientos.
(3) Concepción de diseño y creación de prototipos.
(4) Diseño iterativo y refinamiento.
(5) Implementación de la aplicación web.
(6) Mantención de la aplicación web.

En este capítulo se omitirá el procedimiento (4) debido a que el diseño iterativo y el refinamiento es un proceso cíclico y no aporta mayores beneficios que la aplicación final.

4.1. Desarrollo del concepto de la aplicación web

El primer procedimiento es el desarrollo del concepto que incluye: la identificación de la comunidad usuaria e identificación de aspectos técnicos.

4.1.1. Identificación de la comunidad usuaria

Las características necesarias para una correcta identificación de la comunidad usuario son: experiencia en el trabajo, dominio del tema, experiencia computacional y nivel educacional, y finalmente, las tareas que realizan y con qué frecuencia.

Se concluyen en esta investigación dos tipos de usuarios: básico y experto.

A. Usuario básico:

- Tiene poco conocimiento sobre las ondas sísmicas y sólo busca información final.
- En caso de que se genere una alerta, busca saber que debe hacer paso a paso.
- Prefiere la infomación de forma visual y con pocas características.
- Si se ve interesado en el monitoreo de sismos, espera que exista un lugar en la aplicación web donde pueda investigar y que le sean explicados algunos conceptos.

B. Usuario experto:

- Tiene conocimientos acabados sobre las ondas sísmicas y busca resultados e información importante como: Valores extremos, valor medio, duración, entre otros.
- Prefiere la información de forma visual y tablas de datos para poder trabajar.
- Desea tener herramientas de filtrado fácilmente de implementar.
- Desea tener información relevante que le pueda servir a futuro.

4.1.2. Identificación de los aspectos técnicos

Las características necesarias para la identificación de aspectos técnicos incluyen: Lenguaje de programación, framework y tipo de base de datos.

Para esta aplicación, se elige el lenguaje de programación PHP que permite futuros desarrollos y es ideal para la creación web con contenido dinámico. Además, para la interacción con el usuario y la creación de contenido visual, se usa el lenguaje JavaScript, que es un lenguaje de programación interpretado. Junto con lo anterior se elige el framework Bootstrap que entrega herramientas de visualización que simplifican la interacción y es adaptable a las necesidades de la aplicación.

La base de datos necesaria es relacional, ya que tiene datos almacenados que son empleados para generar información definida. En este aspecto se selecciona el sistema de gestión de bases de datos MySQL, administrado por phpMyadmin que facilita la interacción con el lenguaje de programación principal seleccionado.

4.2. Investigación y análisis de requerimientos

Realizar un análisis de requerimientos previene cubrir falencias que se produzcan en el desarrollo intermedio y que pueden retrasar la creación y el refinamiento. En base a los objetivos planteados, los requerimientos son:

- Almacenamiento de grandes cantidades de datos.
- Procesamiento de información eficiente sin retardos desproporcionados.
- Gráficos y tablas manipulables por el usuario.
- Facilidad de uso.
- Escalable para desarrollos futuros.

4.3. Concepción de diseño y creación de prototipos

4.3.1. Concepción de diseño

Es importante identificar las cualidades de otras aplicaciones web similares, las cuales son analizadas también con el objetivo de buscar las carencias que pueden ser cubiertas por esta aplicación. Para ello se analizan las aplicaciones de la USGS (Estados Unidos), la JMA (Japón) y la CSN (Chile)

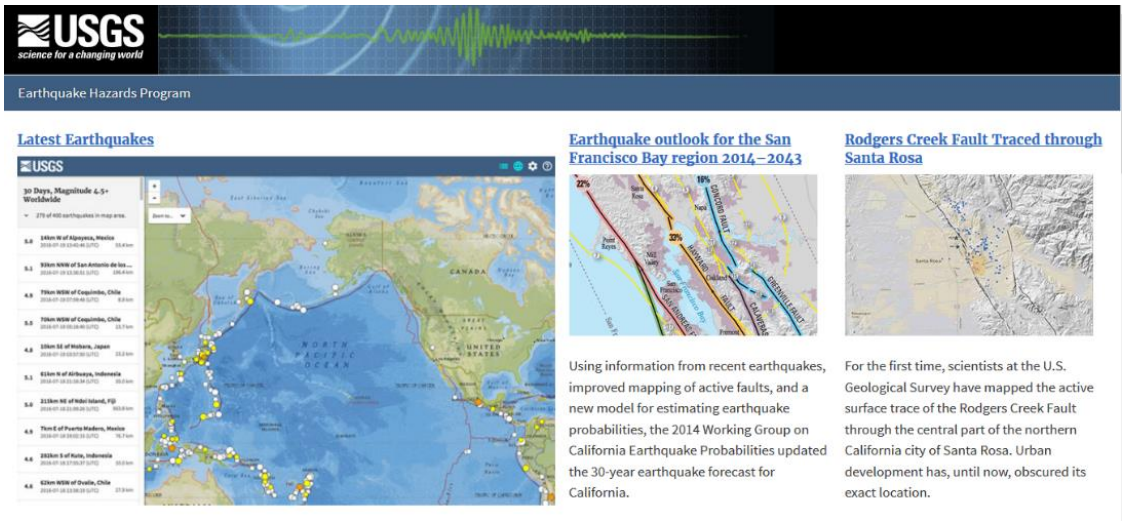


Figura 4.1: Vista principal USGS Earthquake Hazard Program[34]

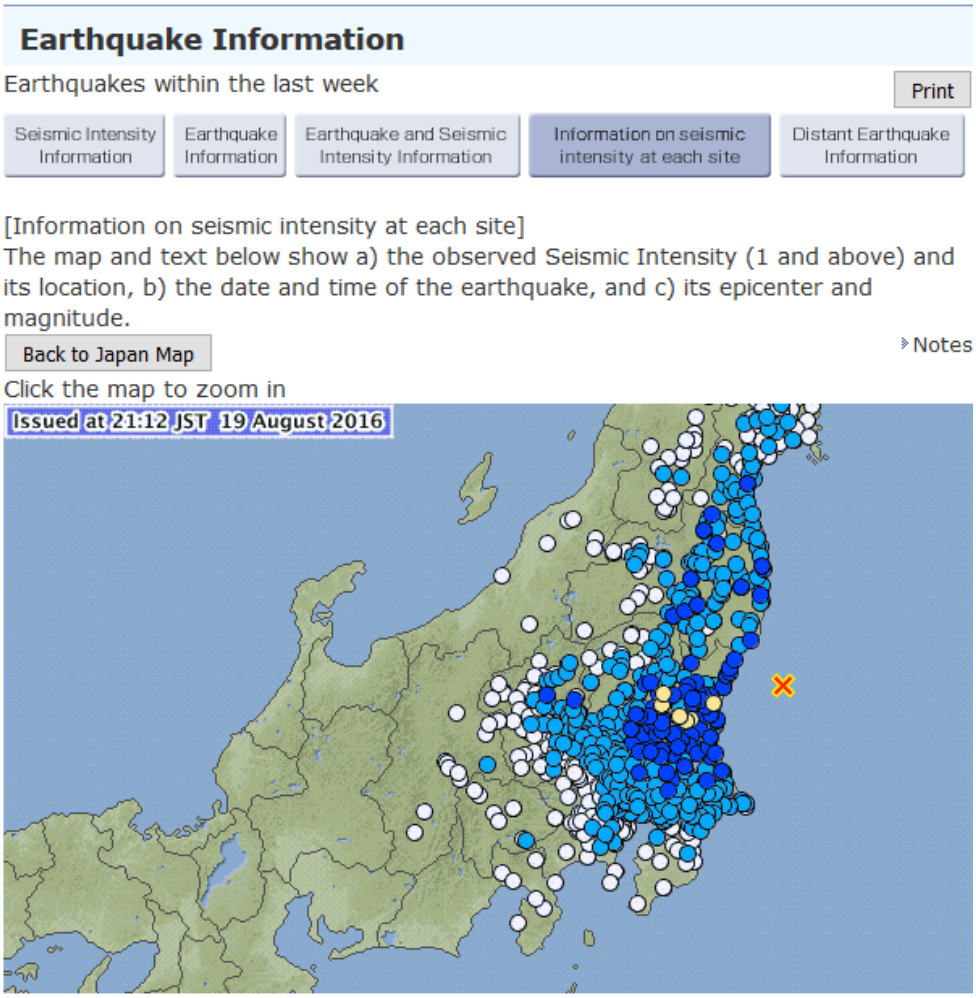


Figura 4.2: Vista principal JMA Earthquake Information[35]

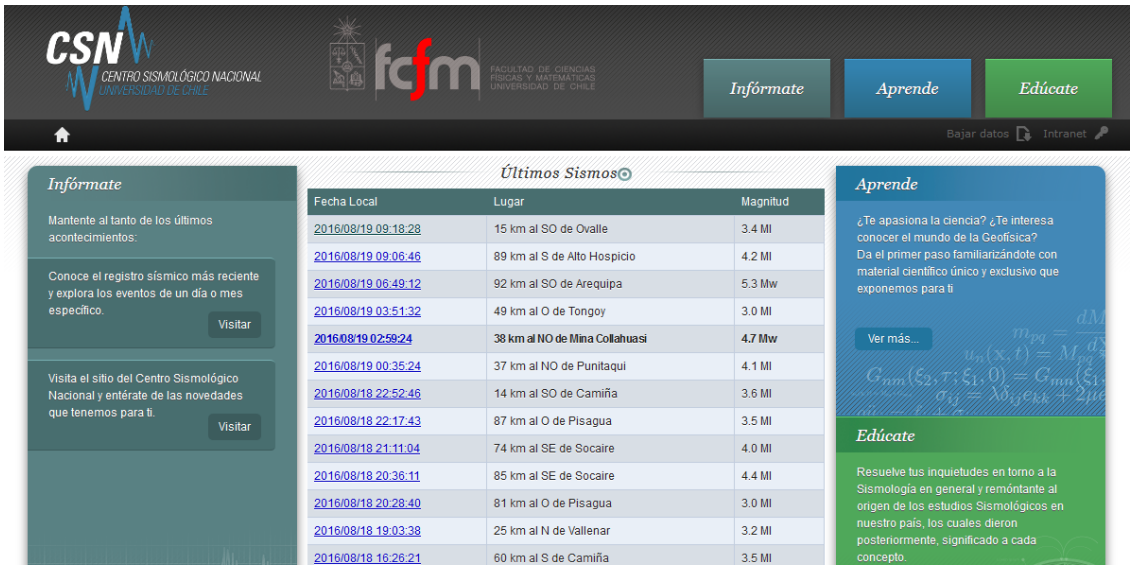


Figura 4.3: Vista principal CSN [36]

Tabla 4.1: Características de aplicaciones Web de USGS, JMA, CSN (Elaboración propia)

Característica\Agencia	**USGS**	**JMA**	**CSN**
Monitoreo en tiempo real	X	X	X
Sismos en mapa	X	X	X
Historial Sísmico	X	X	X
Datos brutos disponibles	X		
Información de sismos a nivel global	X		
Alerta temprana		X	

Al analizar cada aplicación y sus características, se concluye que la más completa es la ofrecida por la USGS, la cual ofrece distintas vistas de usuario donde no solo se pueden observar los últimos eventos sísmicos producidos, sino que ofrece la oportunidad de aprender, de descargar datos, de investigar, entre otras cosas.

4.3.2. Creación de prototipos

La primera aproximación a la aplicación final se muestra en la siguiente figura:

Figura 4.4: Vista principal Aplicación web de la Red de Sensores. (Elaboración Propia)

Se puede observar un menú lateral donde se despliega la información y las subpáginas con las diferentes características que se ofrecen: registro vía Zigbee, registro vía GPRS, registro en vivo SD y Registros Sísmicos. Además, un menú superior con las características básicas de personalización de cada usuario y un espacio para la notificación de nuevos eventos.

4.4. Implementación de la aplicación web

Después de pasar por el procedimiento de diseño iterativo y refinamiento, la aplicación queda operativa para cumplir con los objetivos de la investigación. Además, para facilitar el comprendimiento del lector, se presenta un diagrama de flujo de todos los procesos en esta investigación, desde la transmisión de los nodos hasta el procesamiento final de la información. El nodo “Computador” hace referencia al traspaso de la información desde el nodo receptor a la aplicación web mediante una conexión serial, en esta investigación no se cuenta con un nodo receptor capaz de enviar la información a la base de datos de almacenamiento, como se presenta en el capítulo 7 donde la transmisión mediante GPRS no es efectiva para el traspaso de toda la información, pero es una buena aproximación inicial.

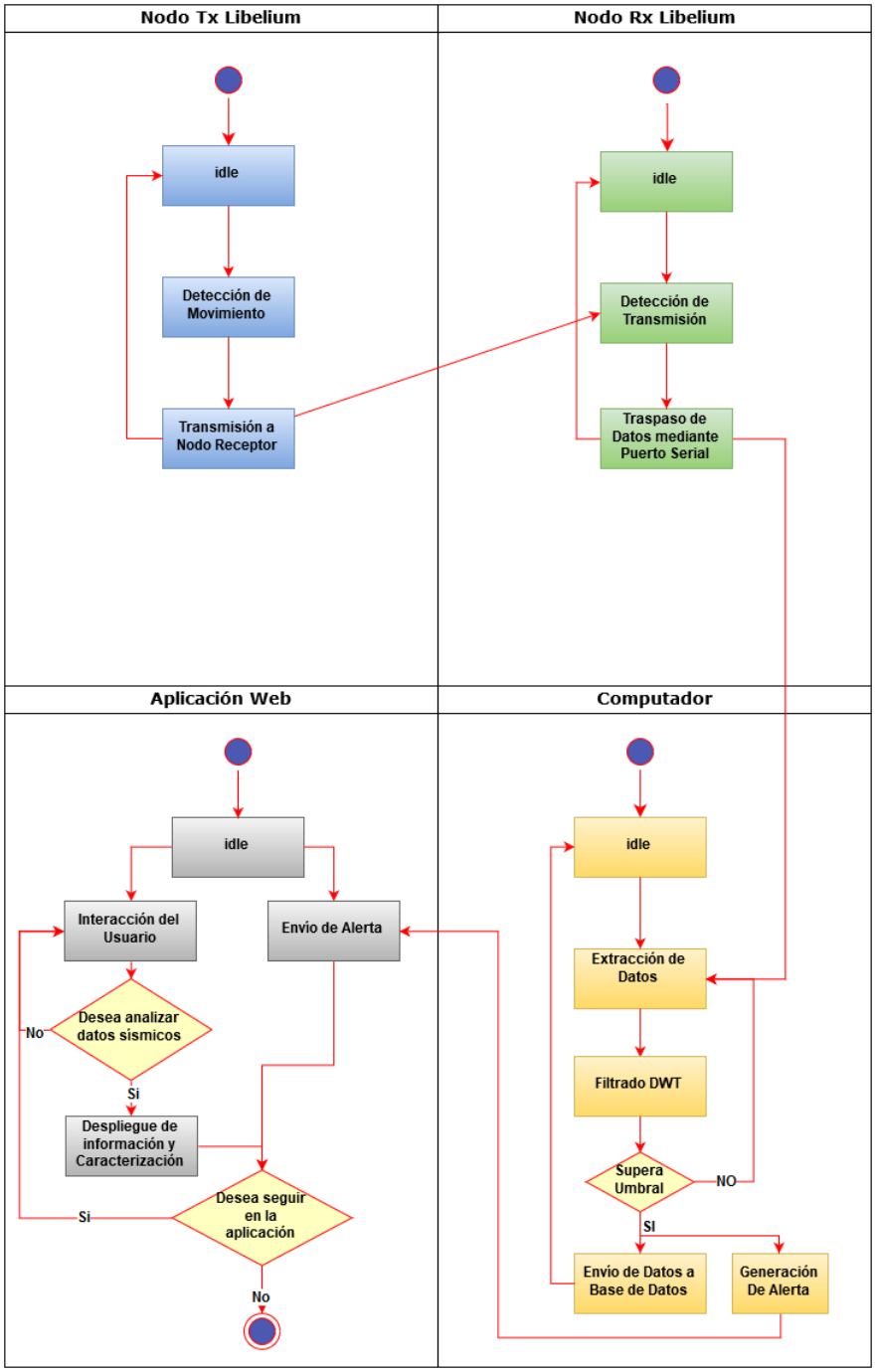


Figura 4.5: Diagrama de flujo de todos los procesos de la investigación (Elaboración propia)

Teniendo presente el comportamiento de todos los procesos, a continuación, se muestran las vistas más importantes de la aplicación.

4.4.1. Registro en vivo mediante Zigbee

Cuando el nodo receptor recibe información del nodo transmisor, esta es enviada a la basa de datos principal donde se almacena: tiempo, aceleración, fecha, nodo transmisor. Luego, en la aplicación en la sección de "Registro en vivo mediante Zigbee" se despliega el gráfico "Aceleración vs Tiempo" como se muestra en la siguiente figura.

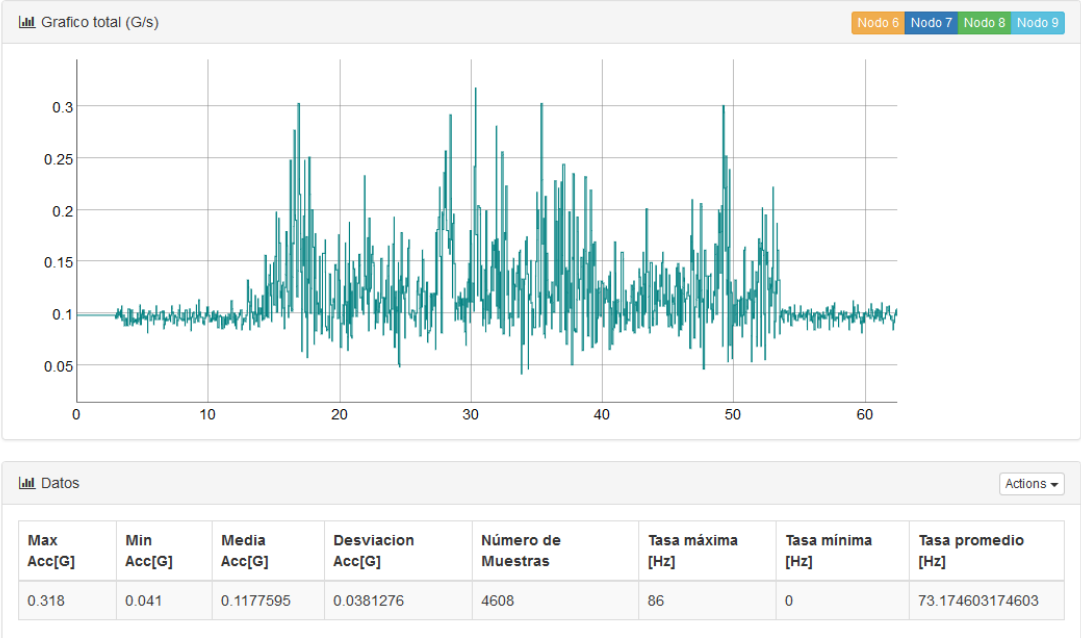


Figura 4.6: Vista del Registro en vivo mediante Zigbee. (Elaboración propia)

Debajo del gráfico se puede observar información a partir de los datos procesados. La información incluye:

1. Aceleración máxima.
2. Aceleración mínima.
3. Aceleración media.
4. Desviación estándar.
5. Número de muestras registradas.
6. Tasa máxima de transmisión.
7. Tasa mínima de transmisión.
8. Tasa promedio.

Dado que el registro se produce en el nodo transmisor, tener la tasa de transmisión exitosa a disposición del usuario, le permite discriminar si los datos son

representativos o no. Como se menciona anteriormente, se necesita una tasa de muestreo igual o superior a 20 [Hz] para asegurar que la transmisión no tiene pérdidas.

4.4.2. Caracterización

Como se puede ver en la vista anterior, el registro sísmico carece de filtrado y se aprecia el ruido que es recibido. Para ello, la aplicación debe ser capaz de filtrar y comparar con otros registros si es necesario, tanto del mismo como anteriores. Es por ello que la siguiente vista representa el escenario anterior:

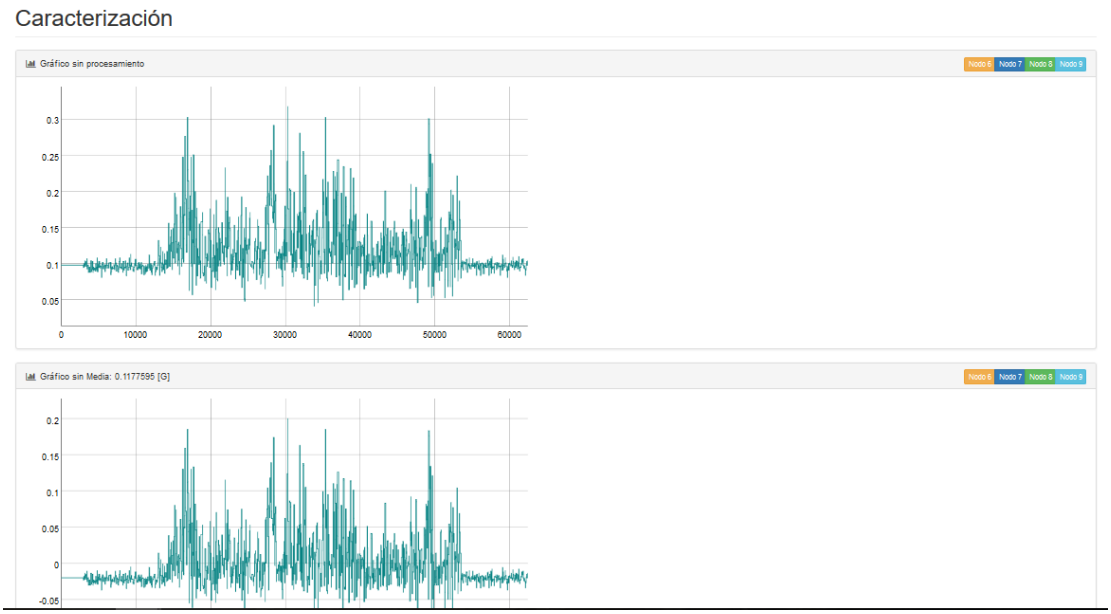


Figura 4.7: Caracterización del evento sísmico. (Elaboración Propia)

4.4.3. Registro histórico de movimientos sísmicos

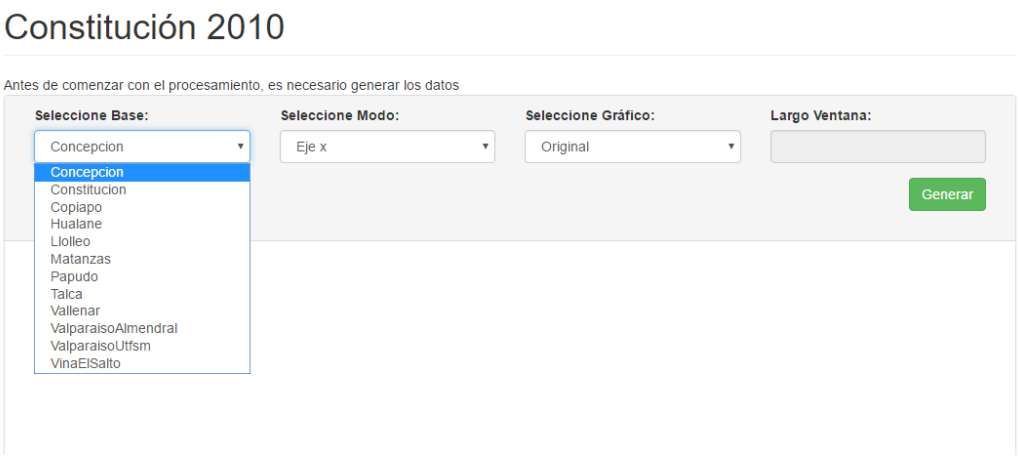


Figura 4.8: Vista de representación de movimientos sísmicos anteriores. (Elaboración Propia)

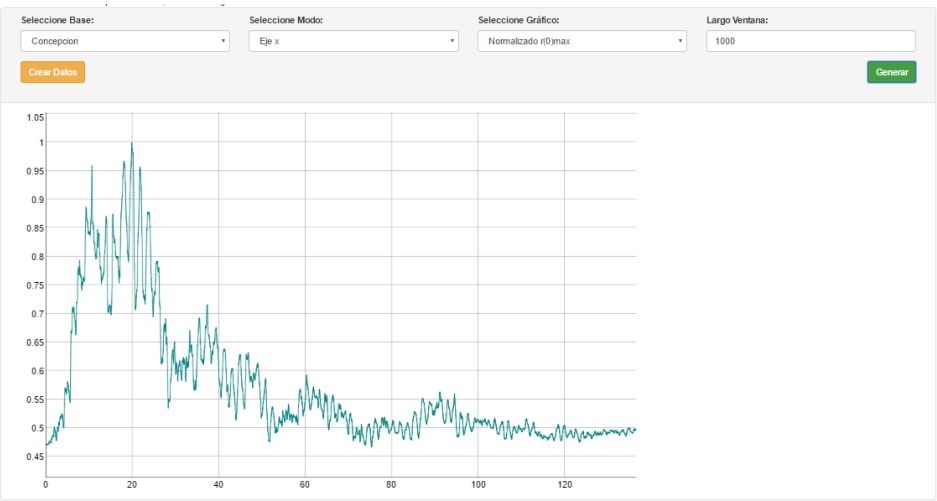


Figura 4.9: Vista de representación de movimientos sísmicos anteriores con filtrado. (Elaboración Propia)

4.5. Mantención de la aplicación web

En esta investigación se almacena en CD la aplicación web junto con un manual de instalación y uso para posteriores desarrollos. La mantención de la aplicación web sólo consiste en actualizar la información.

Capítulo 5: Procesamiento de la información para generar alerta temprana.

A nivel mundial existen muchas redes de sensores, acelerómetros o sismómetros que miden y guardan información sobre las ondas producidas por un sismo, pero muy pocas han implementado un sistema de alerta temprana. Como se ha visto en los capítulos anteriores, Japón ha sido uno de los que se han especializado al respecto, pero a nivel nacional aún no existe alguna implementación que genere una alerta temprana.

Asegurada la transmisión, la recolección y una web que muestre la información, nace la motivación de desarrollar una WSN que genere alerta temprana, ya que Chile es un país sísmico y sería muy importante para la población contar con una red de este tipo.

Para lograr alerta temprana, la idea es poder detectar la onda P (onda Primaria) que se produce durante un sismo[37]. Esta onda llega segundos antes que la onda S (onda Secundaria y destructiva), la diferencia de tiempo que hay entre las 2 ondas dependerá de la distancia entre nodo y epicentro.

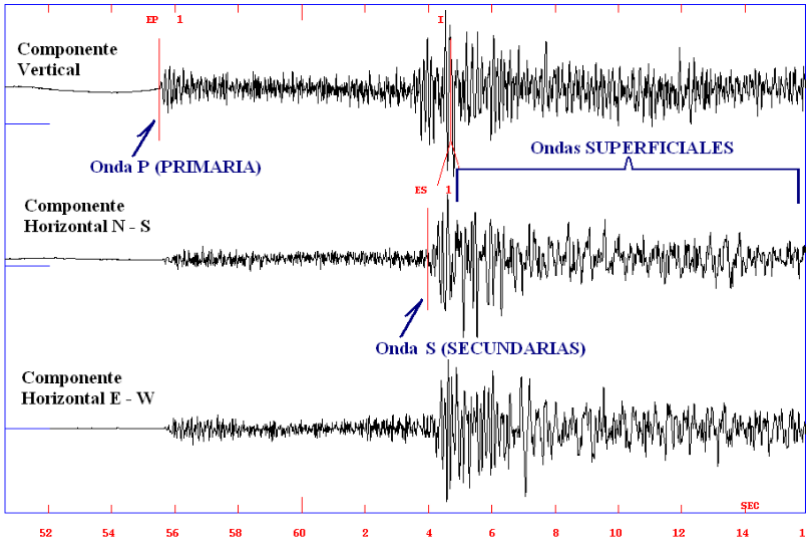


Figura 5.1: Arribo de ondas P y S en una estación de 3 componentes, Prado, Red Sismológica de Colombia.[38]

Como se aprecia en la figura anterior, las ondas sísmicas se analizan en cada eje, es decir: x, y, z como horizontal EW, horizontal NS y vertical respectivamente. Las ondas P se identifican principalmente en la componente vertical, tal cual se logra ver en la figura.

Para el caso de esta investigación, se decide realizar el procesamiento necesario para alerta temprana en el computador receptor o servidor, ya que el Waspmote transmisor no tiene la capacidad en cuanto a memoria RAM (Random Access Memory) para realizarlo. En caso de poder extender la capacidad de almacenamiento mediante memoria adicional, este procesamiento se podría llevar a cabo. Esta alternativa no fue considerada en este proyecto, quedando abierta como opción futura.

Al nodo receptor o al servidor, no llegan las aceleraciones de cada eje, sino más bien la aceleración neta, tal como se menciona en el capítulo 3 de transmisión. Por lo cual se debe verificar si en la aceleración neta se puede identificar la onda P. Para ello se recurre a analizar datos sísmicos de años anteriores, específicamente datos del Terremoto del 2010 en Chile[39], donde se tiene la aceleración por cada eje, con esto se calcula la aceleración neta, para así posteriormente ver la onda P en cada eje y comparar con la aceleración neta gráficamente. A continuación, se ve parte del análisis realizado en las siguientes figuras (para más gráficos con respecto a esto, ver CD Anexo).

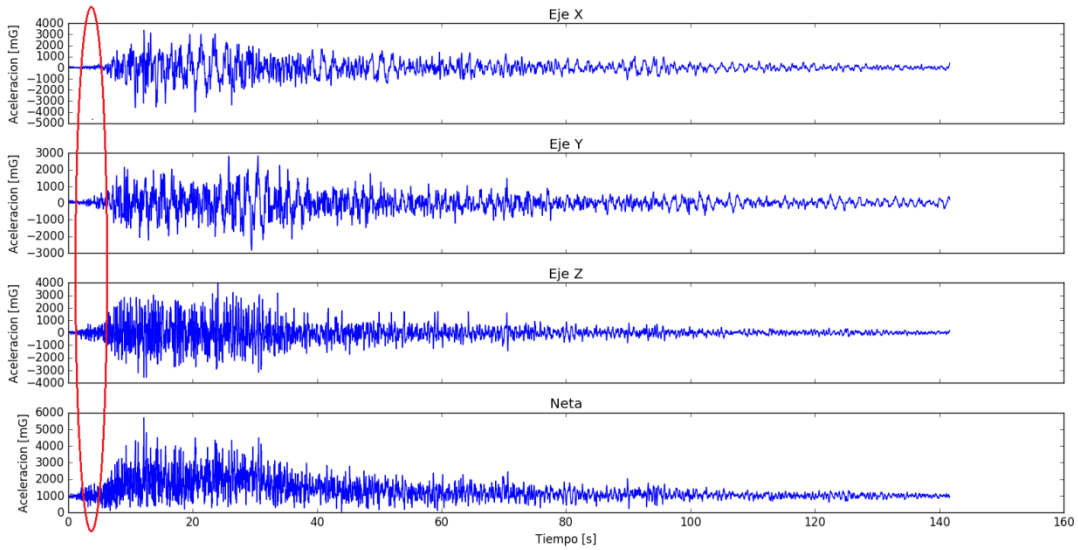


Figura 5.2: Análisis gráfico de onda P para una aceleración neta, sismo de Concepción 2010. (Elaboración Propia)

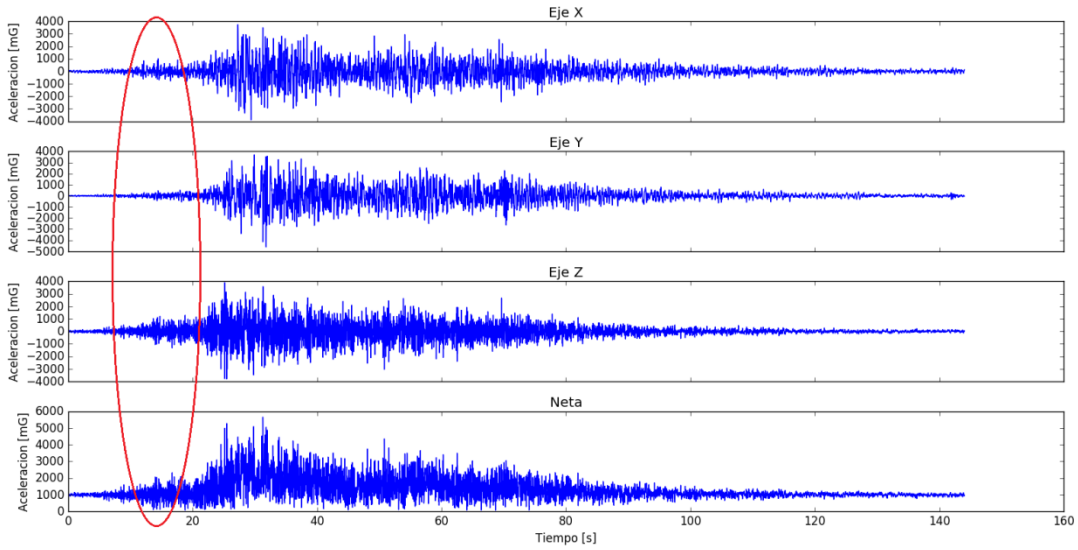


Figura 5.3: Análisis gráfico de onda P para aceleración neta, sismo de Hualañé 2010. (Elaboración Propia)

Después del análisis realizado, se concluye que dentro de la aceleración neta sí se logra reconocer la onda P, por lo que se puede proseguir con el procesamiento usando la aceleración neta para generar alerta temprana.

Ahora se debe realizar un algoritmo que sea capaz de detectar una onda P, con el cual se pueda generar la alerta. Dentro de los algoritmos más usados para esto es STA/LTA[40], mencionado ya en el capítulo 2 del Estado del Arte.

Este algoritmo principalmente se encarga de realizar una relación entre una ventana corta promedio y una ventana larga promedio de datos. Lo que se muestra mucho mejor en las siguientes ecuaciones:

$$STA(t) = \frac{1}{S}\sum_{j=0}^{S-1}\left|w(t-j)\right|$$

Ecuación 5.1: Fórmula para calcular STA.[41]

$$LTA(t) = \frac{1}{L}\sum_{j=0}^{L-1}\left|w(t-j)\right|$$

Ecuación 5.2: Fórmula para calcular LTA.[41]

Donde:

$$S = Tasa\ de\ Muestreo \times Largo\ de\ ventana\ STA\ en\ segundos$$

$$L = Tasa\ de\ Muestreo \times Largo\ de\ ventana\ LTA\ en\ segundos$$

$$w(t) = Aceleración\ neta\ en\ tiempo\ t.$$

Teniendo estas dos ventanas se realiza una relación entre ellas, relación que si supera un umbral predeterminado gatilla la alerta. Esto se representa gráficamente de la siguiente forma:

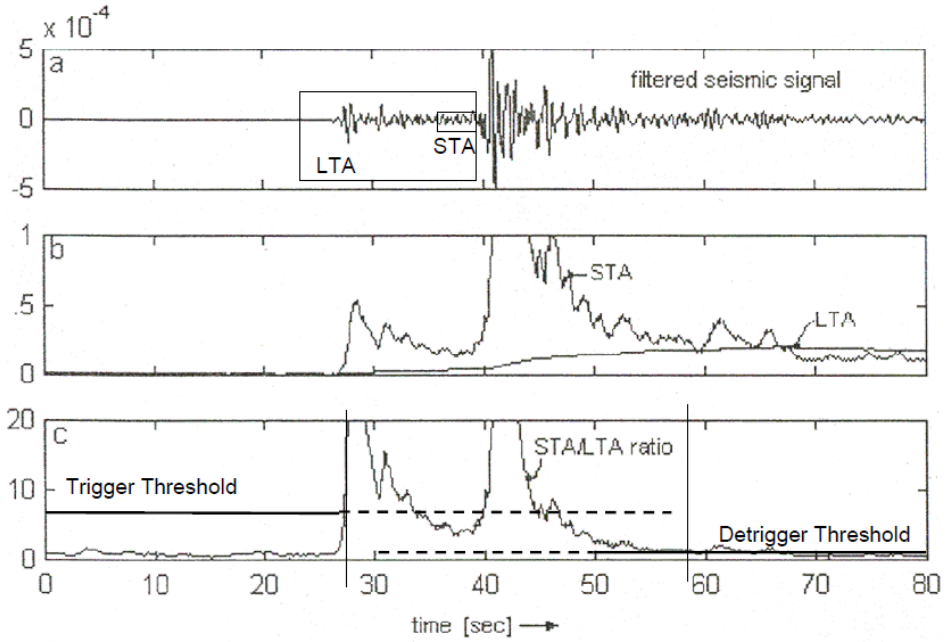


Figura 5.4: Ventanas STA y LTA que avanzan en el tiempo hacia la derecha.[41]

Al conocer el algoritmo necesario para detectar la onda P y generar la alerta, queda por determinar el umbral que se debe superar para que gatille lo dicho, para esta investigación se hace el estudio y análisis mediante los datos del terremoto del

2010 usando la aceleración neta. Parte del análisis se muestra en las siguientes figuras (para más figuras con dicho análisis ver CD Anexo):

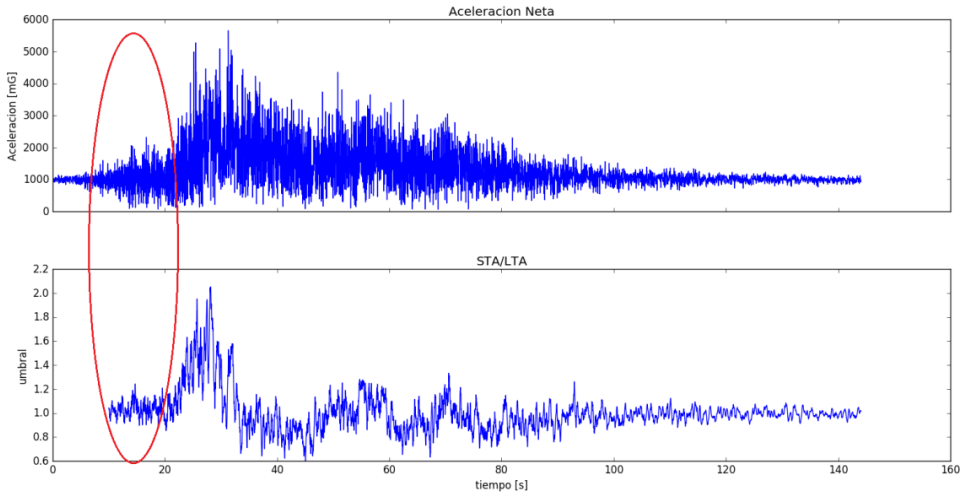


Figura 5.5: Análisis para selección de umbral de detección de onda P, sismo Hualañe 2010. (Elaboración Propia)

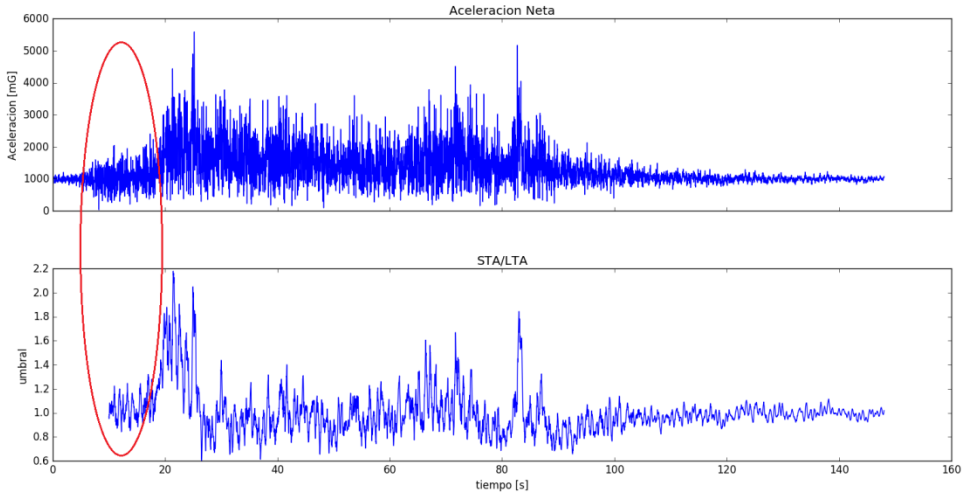


Figura 5.6: Análisis para selección de umbral de detección de onda P, sismo Talca 2010. (Elaboración propia)

Se menciona que para esta investigación el largo en tiempo de la ventana STA y LTA fue de 0.3 segundos y 10 segundos respectivamente. Al realizar un análisis a las gráficas que se obtienen de los datos del 2010, se puede apreciar que el umbral para detectar una onda P oscila entre los valores 1.1 y 1.3, por lo que se determina que el umbral a usar para generar alerta temprana es de un STA/LTA de 1.2.

Capítulo 6: Procesamiento de la información para la caracterización de ondas sísmicas.

Como se observa en la figura 4.6 del Capítulo 4, la aplicación muestra información importante de las ondas sísmicas. Cada característica se determina a partir de las tablas en la base de datos principal, esto facilita y acelera el procesamiento. A continuación, se presenta como se extraen utilizando el lenguaje SQL:

1. **Aceleración máxima:**
   SELECT max(aceleracion) FROM acc_fecha WHERE nodo=X

2. **Aceleración mínima:**
   SELECT min(aceleracion) FROM acc_fecha WHERE nodo=X

3. **Aceleración media:**
   SELECT avg(aceleracion) FROM acc_fecha WHERE nodo=X

4. **Desviación estándar.**
   SELECT STD(aceleracion) FROM acc_fecha WHERE nodo=X

5. **Número de muestras registradas.**
   SELECT COUNT(aceleracion) FROM acc_fecha WHERE nodo=X

Existen otras características importantes que se extraen a partir de un procesamiento más compejo:

```
$j=0;$ii=0;
for($k=0;$k<$max_tiempo;$k+=1000)
{
  $j=$k+1000;
  $query5="SELECT COUNT(indice) FROM acc WHERE tiempo BETWEEN '$k' and '$j' AND nodo='$nod'";
  $result = mysqli_query($con,$query5);
  if ($result)
    {
      while($row = mysqli_fetch_array($result))
       {
         $tasas[$ii]=$row['COUNT(indice)'];
         $tiempo_tasas[$ii]=$k."-".$j;
       }
    }
  else
    {
      die("error de lectura en BD");
    }
  $ii++;
}
```

Figura 6.1: Código para determiner tasas de muestreo. (Elaboración Propia)

El código PHP extrae el número de muestras que existen por segundo y son almacenadas en un arreglo llamado $tasas. A partir del arreglo, se pueden determinar las siguientes características:

6. **Tasa máxima:**
   max($tasas)

7. **Tasa mínima:**
   min($tasas)

8. **Tasa promedio:**
   array_sum($tasas)/count($tasas)

Todas las características anteriores son descriptivas y propias de cada onda sísmica. Sin embargo, como se menciona en el capítulo 2 del Estado del Arte[20], se pueden utilizar ventanas de observación para generar una función de correlación normalizada que permita identificar la periodicidad (en caso de que hubiese) y la ocurrencia de cambios importantes en la señal que se puedan atribuir a la presencia de una onda P o S. Para ello, se emplea un procedimiento basado en el propuesto por R. Zwlenovsky & R. D. León[42].

En la figura 2.9 se puede ver la ecuación de autocorrelación que se utiliza para el proceso de señales, la cual consiste en una correlación cruzada de la señal consigo misma, desfasada en un tiempo τ. En esta caracterización, los datos son extraídos de la Base de Datos y traspasados a un archivo de texto plano para facilitar la manipulación y mejorar la velocidad de creación de los gráficos. A continuación, se muestran las distintas vistas disponibles dentro de la aplicación web para este proceso.

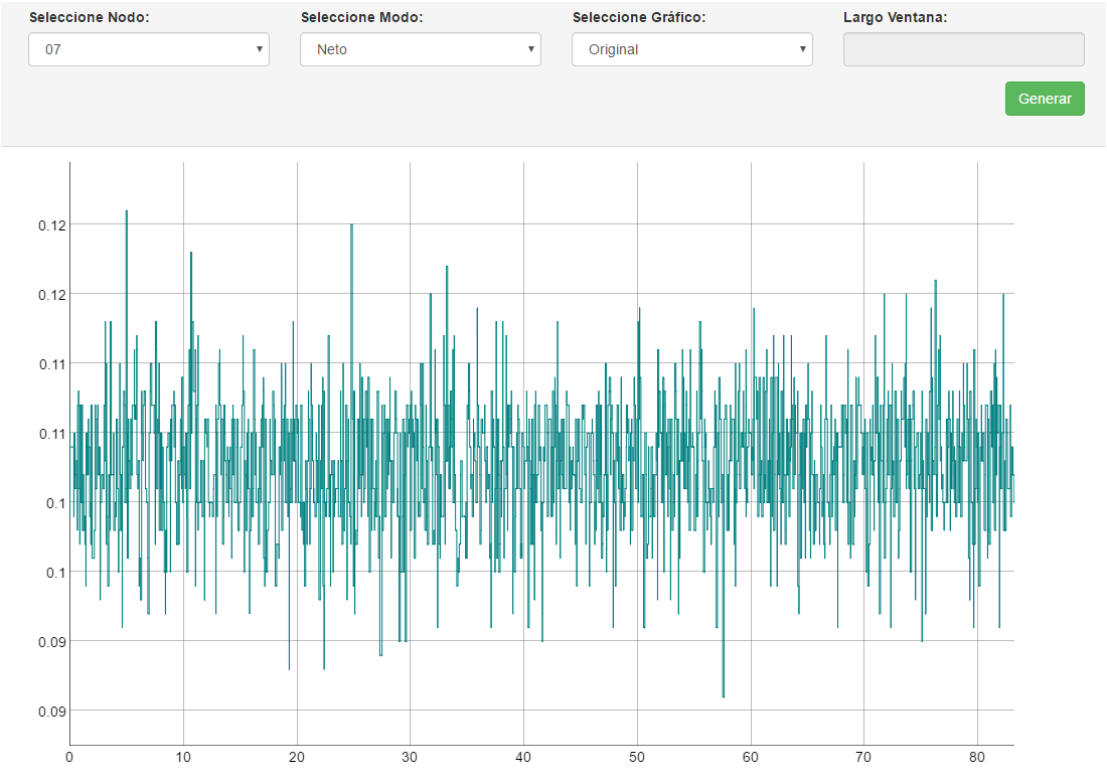


Figura 6.2: Aceleración Neta sin procesamiento. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia)

Para poder tener un procesamiento más limpio y con una menor presencia de ruido, se utiliza la transformada de Wavelet, usando la familia Daubechies, en específico Daubechies 10[43], ésta considerada la más adecuada para esta investigación, por su similitud con las ondas sísmicas, dentro de las diferentes familias Wavelet.

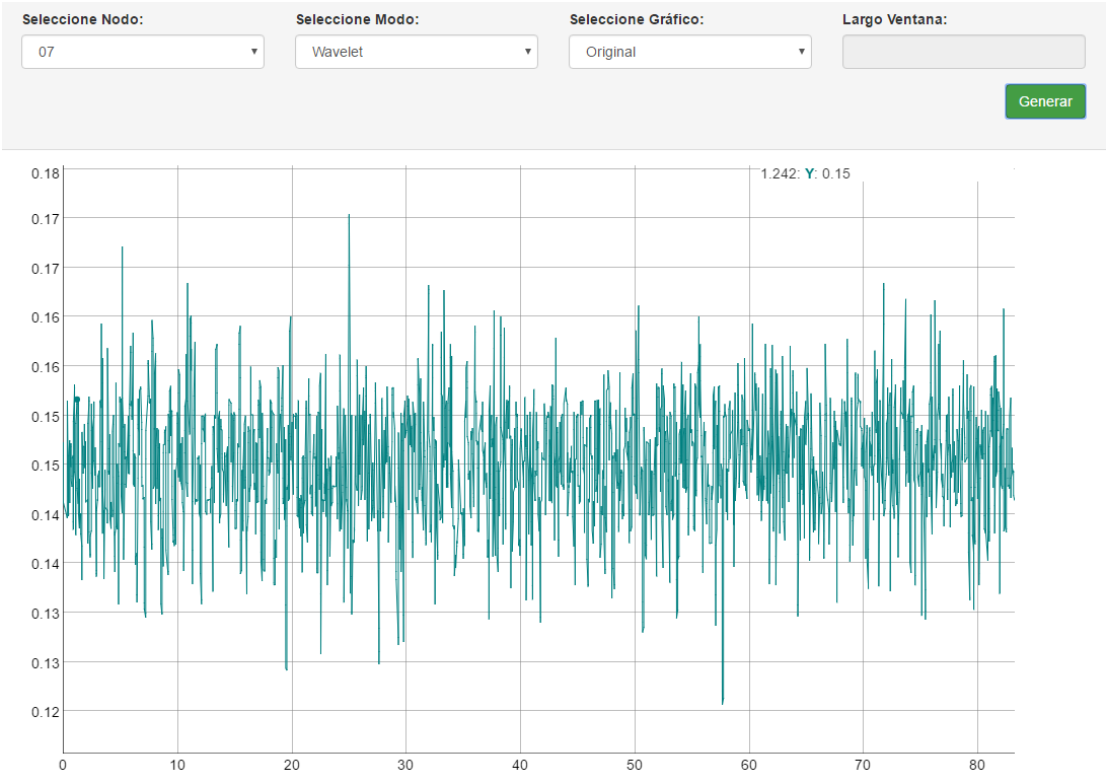


Figura 6.3: Aceleración neta con filtrado de ruido mediante Wavelet. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia)

La autocorrelación también depende del largo de la ventana que se escoga para recorrer toda la muestra. Es por ello que se permite al usuario la interacción respecto al largo de la misma, porque no existe un largo predeterminado y cada señal es diferente en su forma y en su cantidad de datos. Para ello se utiliza la normalización ρ1[20] descrita en la figura 2.10 donde el desfase es 0.

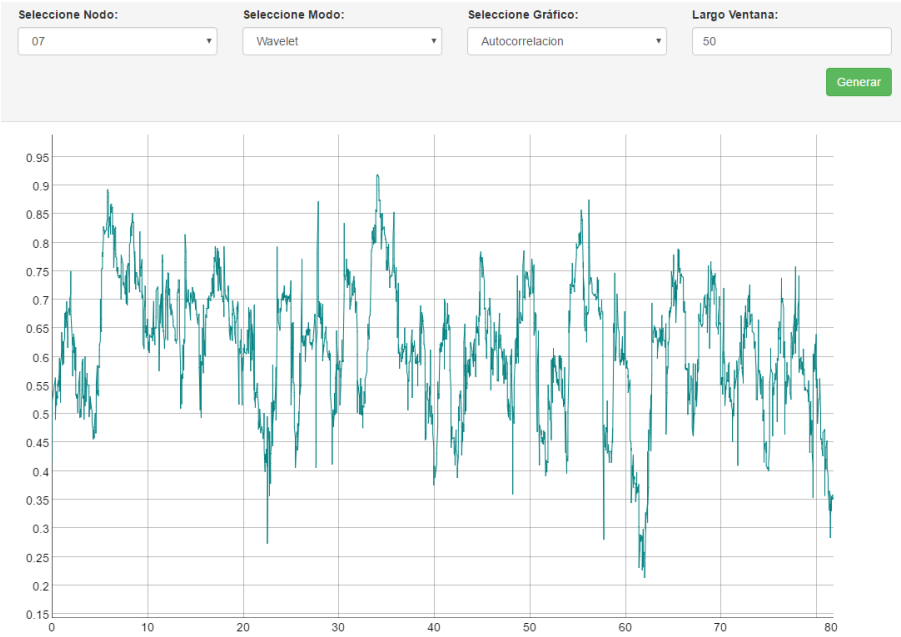


Figura 6.4: Función de autocorrelación de Aceleración después de la transformada Wavelet con una ventana de 50 datos. Tiempo [s] (Elaboración Propia)

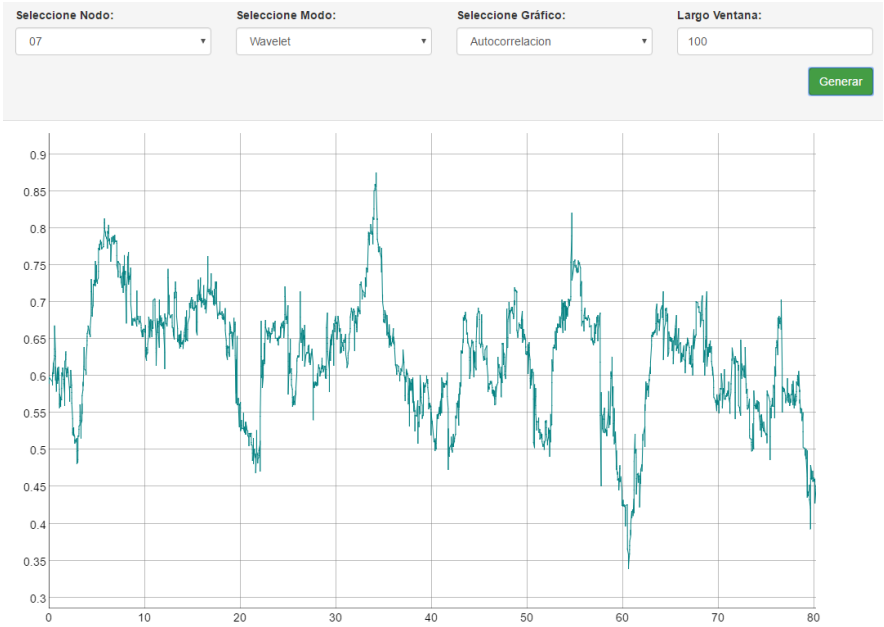


Figura 6.5: Función de autocorrelación de Aceleración después de la transformada Wavelet con una ventana de 100 datos. Tiempo [s] (Elaboración Propia)

La función de normalización ρ1max y ρ1min permiten describir de mejor manera la forma de la señal, además, extrae el ruido perteneciente al canal y al instrumento.

$$\rho_{1max_u} = \frac{r(1)_u}{\max\,(r(o))}$$
$$u = \{1,2,3 \ldots\ldots N_{ventanas_{total}}\}$$

Figura 6.6: Función de normalización ρ1max.[20]

$$\rho_{1\min_u} = \frac{\mathrm{r}(1)_u}{\min\,(\mathrm{r}(\mathrm{o}))}$$
$$u = \{1,2,3 \ldots\ldots N_{ventanas_{total}}\}$$

Figura 6.7: Función de normalización ρ1min.[20]

El usuario también tiene a disposición elegir el largo de la ventana de acuerdo a la precisión que desea buscar y el número de datos que tenga. A continuación, se presentan dos figuras de las vistas.

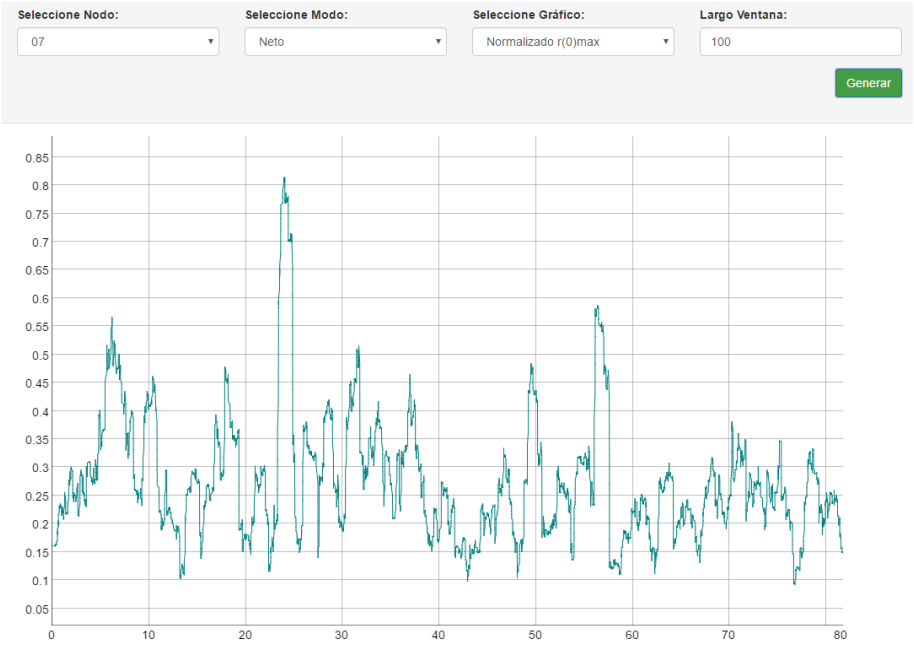


Figura 6.8: Función de normalización ρ1max con ventana de 100 datos. (Elaboración propia)

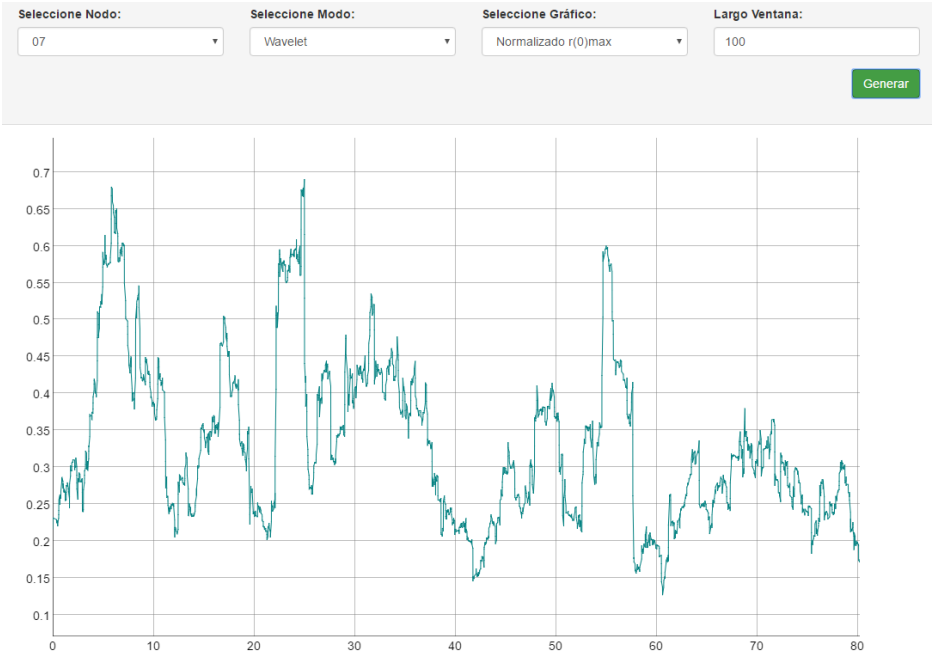


Figura 6.9: Función de normalización ρ1max con ventana de 100 datos después de transformada Wavelet. (Elaboración propia)

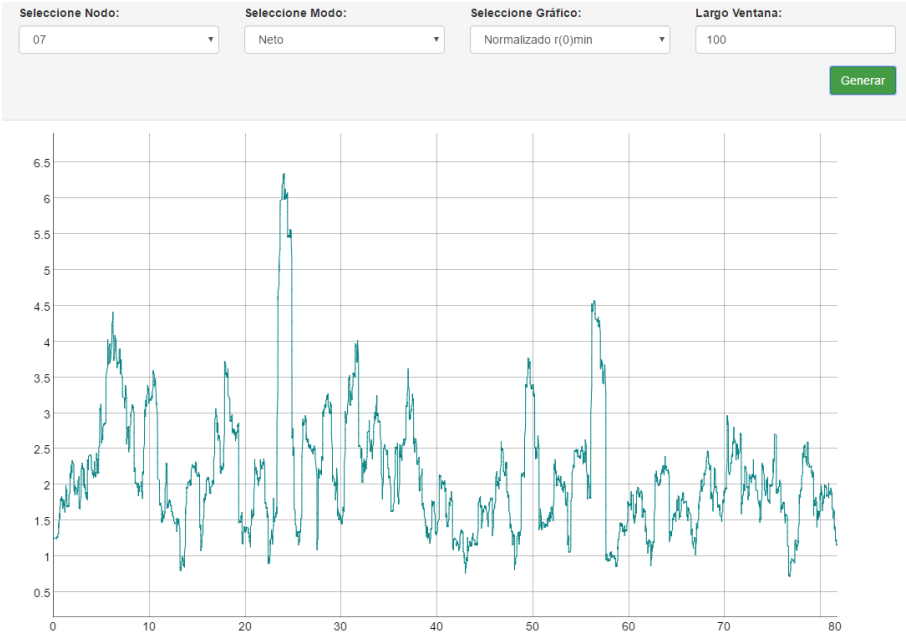


Figura 6.10: Función de normalización ρ1min con ventana de 100 datos. (Elaboración propia)

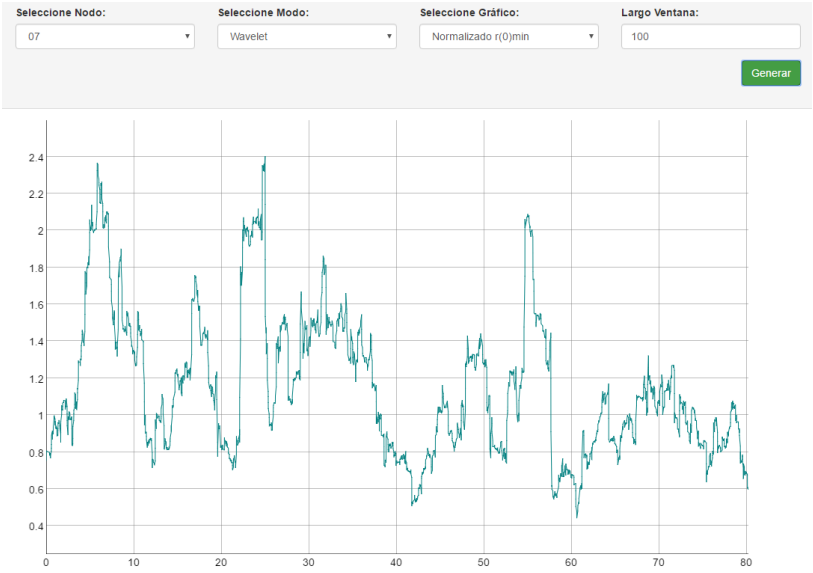


Figura 6.11: Función de normalización ρ1min con ventana de 100 datos después de transformada Wavelet. (Elaboración propia)

En los gráficos desplegados se puede notar la diferencia en el procesamiento con y sin la transformada Wavelet. Esta última permite recontruir la forma de la figura de mejor manera que sin ella.

Capítulo 7: Presentación y análisis de resultados.

7.1. Zigbee.

Se realizan pruebas de una red Zigbee implementada con un waspmote transmisor, un Gateway y un waspmote receptor como la mostrada en la figura 3.7 del capítulo 3. Se realizan pruebas para medir ruido, medir la tasa de transmisión que se consigue y por último se compara una señal registrada sin transmisión frente a la transmitida por Zigbee.

7.1.1.Ruido.

Para analizar el ruido que existe al momento de medir aceleración en el transmisor, se realiza un experimento con el transmisor estático, para así conocer la variación de aceleración que se produce, lo que se muestra gráficamente en la siguiente figura:

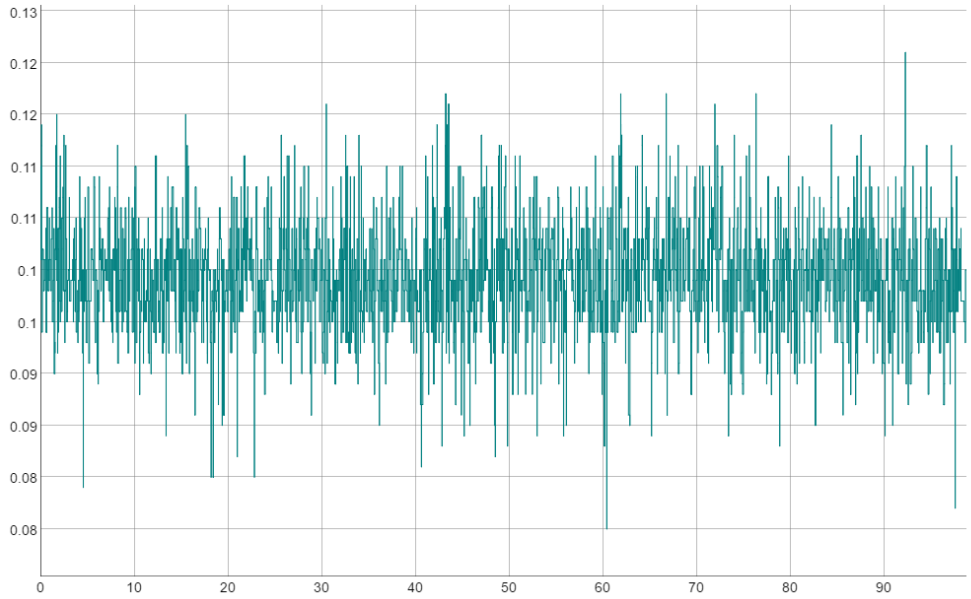


Figura 7.1: Aceleración medida con el transmisor estático. Aceleración en [G] y Tiempo en [s]. (Elaboración Propia)

Como se puede ver, la aceleración oscila entre los 0.08 [G] y los 0.12 [G], lo que se traduce como una mínima variación de la aceleración. De igual forma la señal conseguida se analiza mediante correlación, para así comprobar cuán correlativas son las aceleraciones medidas:

Figura 7.2: Correlación de aceleración medida con transmisor estático. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia)

Se puede apreciar del gráfico anterior que la correlación en promedio es del 75%, lo que indica que las aceleraciones medidas con el transmisor estático poseen una pequeña variación, lo que corresponde a ruido. Ya que hay existencia de ruido en la medición, es importante filtrar la señal para eliminarlo. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, para esta investigación se hace uso de la transformada Wavelet para el filtrado.

7.1.2. Tasa de transmisión.

Para medir la tasa de transmisión que se consigue con la red Zigbee implementada, se realiza un experimento en un escenario como el mostrado en la figura 7.3. Donde se ubica el transmisor a una distancia de 75 [m] del receptor y Gateway, y se mide la tasa que se produce tanto en una trasmisión en línea de vista como sin línea de vista (enlace obstruido).

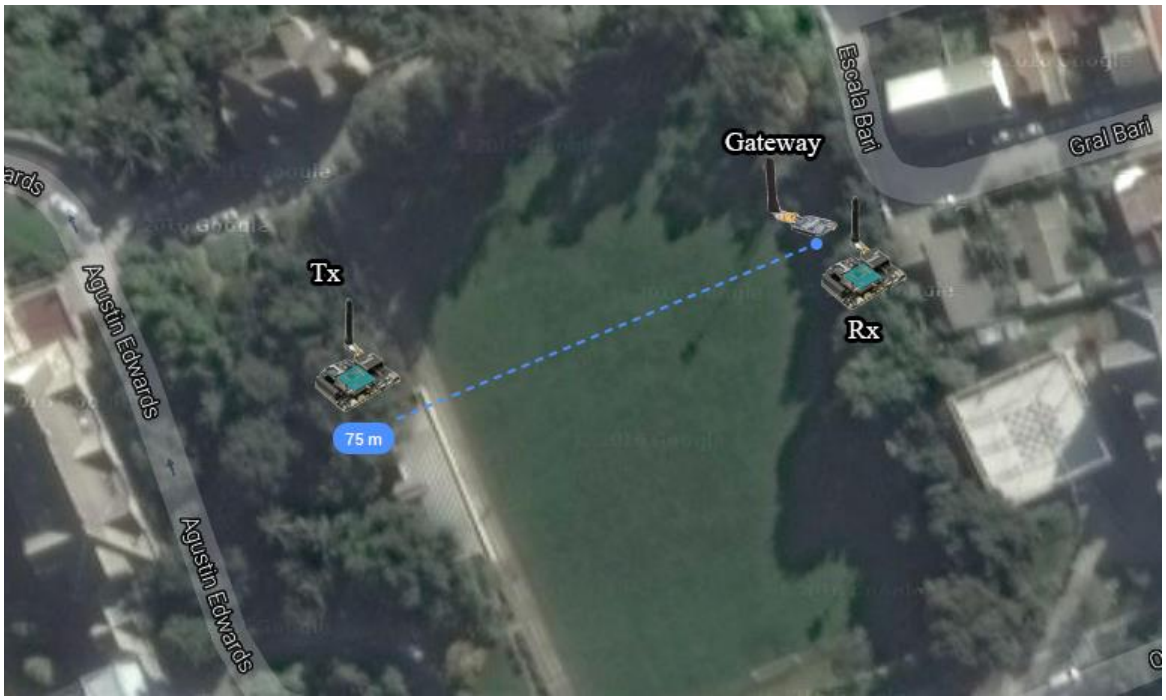
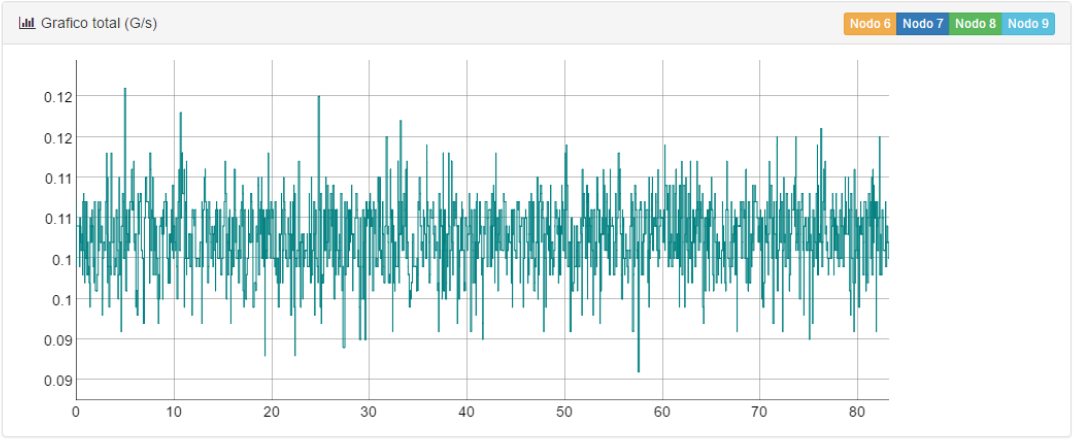


Figura 7.3: Escenario de transmisión con y sin Línea de Vista. Cancha UTFSM. (Elaboración Propia)

7.1.2.1. Transmisión en línea de vista.

Para este experimento se mide la aceleración con el transmisor estático primero y luego con el transmisor experimentando movimiento y se verifica la tasa de transmisión que se consigue en ambos casos. Con lo cual se obtiene lo siguiente:

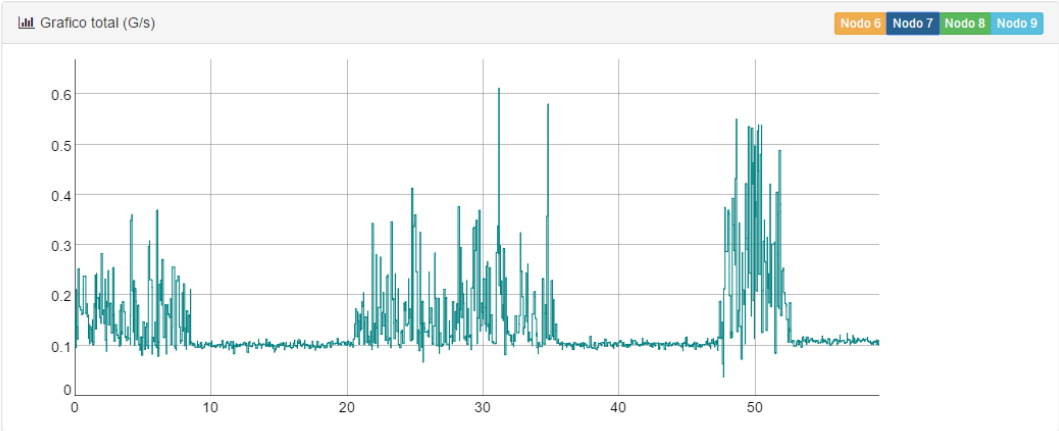


Datos

Actions

Max Acc[G]	Min Acc[G]	Media Acc[G]	Desviacion Acc[G]	Número de Muestras	Tasa máxima [Hz]	Tasa mínima [Hz]	Tasa promedio [Hz]
0.121	0.086	0.1026356	0.0044501	5576	80	23	66.404761904762

Figura 7.4: Tasa de transmisión en Línea de Vista con transmisor estático. Aceleración [G] y Tiempo [s] (Elaboración propia)



Datos

Actions

Max Acc[G]	Min Acc[G]	Media Acc[G]	Desviacion Acc[G]	Número de Muestras	Tasa máxima [Hz]	Tasa mínima [Hz]	Tasa promedio [Hz]
0.612	0.038	0.1417679	0.0748322	4248	80	15	70.966666666667

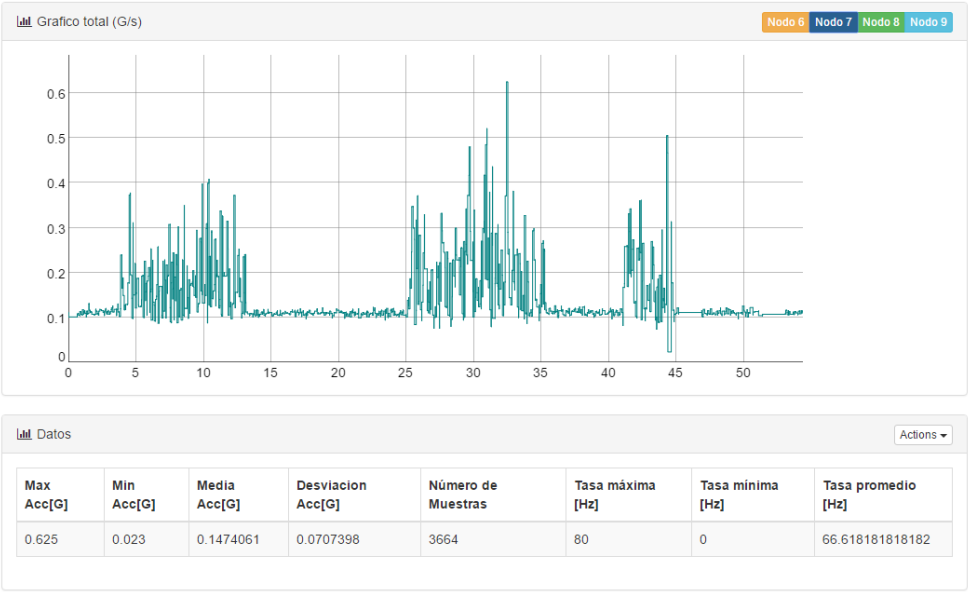
Figura 7.5: Tasa de transmisión en Línea de Vista con transmisor experimentando movimiento. Aceleración [G] y Tiempo [s] (Elaboración propia)

Se puede apreciar que para el primer caso se obtiene una tasa máxima de 80 [Hz], (tasa correspondiente a la recuperación de los datos transmitidos) una mínima de 23 [Hz] y un promedio de 66 [Hz]. Para el segundo caso se consigue una máxima de 80 [Hz], una mínima de 15 [Hz] y un promedio de 70 [Hz]. Por lo que se concluye que en Línea de Vista se consigue una buena tasa de transmisión para el objetivo de esta investigación, donde se necesita que se supere una tasa de 20 [Hz] para poder recuperar una señal sísmica, ya que éstas tienen una frecuencia de 0 a 10 [Hz].

Por otra parte, para este experimento no se hace una evaluación para medir las pérdidas de paquetes en la transmisión. Esto se podría hacer comparando en el transmisor y receptor de forma serial. No se recomienda comparar los datos recibidos con datos almacenados en una tarjeta SD en el transmisor dado que las velocidades de ambos son distintas.

7.1.2.2. Transmisión sin línea de vista.

Para este experimento se mide la aceleración con el transmisor experimentando movimiento y se verifica la tasa de transmisión que se consigue en este caso, donde transmisor y receptor no están en Línea de Vista. Con lo cual se obtiene lo siguiente:



Max Acc[G]	Min Acc[G]	Media Acc[G]	Desviacion Acc[G]	Número de Muestras	Tasa máxima [Hz]	Tasa mínima [Hz]	Tasa promedio [Hz]
0.625	0.023	0.1474061	0.0707398	3664	80	0	66.618181818182

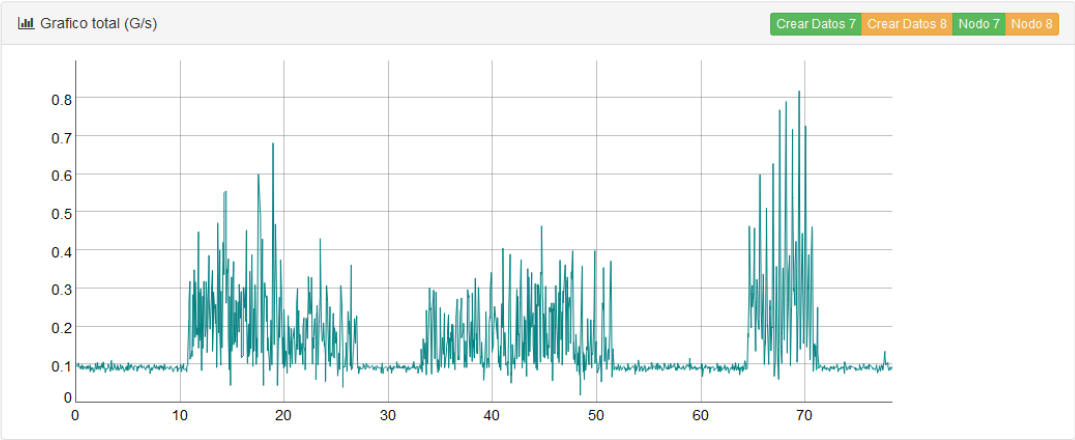
Figura 7.6: Tasa de transmisión sin Línea de Vista con transmisor experimentando movimiento. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia)

Se consigue una tasa máxima de 80 [Hz], una mínima de 0 [Hz] y una promedio de 66[Hz], por lo cual también se consigue una tasa suficiente para cumplir el objetivo de la investigación.

7.1.3. Comparación con registro sin transmisión.

Se realiza una comparación de la señal transmitida por Zigbee frente a un registro sin transmisión, donde se almacenan los datos en una tarjeta de memoria SD. Se compara para analizar si las pérdidas de paquetes que existe en la red influye significativamente o no en el resultado de la señal transmitida.

El experimento se desarrolla en el mismo waspmote transmisor, es decir, las aceleraciones que experimenta el waspmote se registran en la SD y al mismo tiempo se transmiten por Zigbee a una base de datos. Luego se consiguen las siguientes gráficas en cada caso:

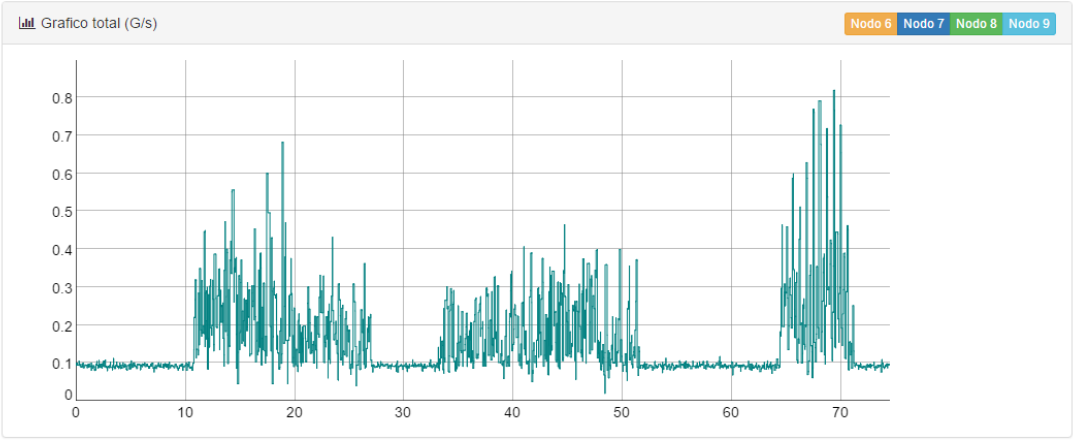


Datos

Actions

Max Acc[G]	Min Acc[G]	Media Acc[G]	Desviacion Acc[G]	Número de Muestras	Tasa máxima [Hz]	Tasa mínima [Hz]	Tasa promedio [Hz]
0.819	0.019	0.1532469	0.1050288	2932	44	20	37.126582278481

Figura 7.7: Registro sin transmisión, almacenado en una SD. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia)



Datos

Actions

Max Acc[G]	Min Acc[G]	Media Acc[G]	Desviacion Acc[G]	Número de Muestras	Tasa máxima [Hz]	Tasa mínima [Hz]	Tasa promedio [Hz]
0.819	0.019	0.1562865	0.1067092	5584	88	47	74.48

Figura 7.8: Registro de la señal transmitida por Zigbee. Aceleración [G] y Tiempo [s]. (Elaboración Propia)

Se puede apreciar que la señal registrada sin transmisión frente a la registrada con transmisión inalámbrica es muy similar, por lo que se concluye que aunque se tenga pérdidas de paquetes en una transmisión Zigbee, ésta no influye significativamente en el resultado de la señal.

7.2. GPRS.

7.2.1. Tasa de transmisión.

Para este experimento se ejecuta el código "*GPRS_URL_frame_to_BD*" (Ver en CD Anexo), explicado su proceso en el capítulo 3, del cual se obtiene lo siguiente en el monitor Serial del entorno de desarrollo Waspmote PRO IDE:

```
GPRS_Pro module ready...
GPRS_Pro module connected to the network...
GPRS_Pro module configured to GPRS_HTTP_FTP...
Done
Done
Done
Done
```

Figura 7.9: Monitor Serial de la transmisión GPRS. (Elaboración Propia)

Se puede apreciar que para realizar la transmisión por GPRS desde el waspmote, éste necesita primero encender el módulo GPRS, conectarse a la red GPRS y configurar el protocolo HTTP y FTP, luego cada "*Done*" indica que ha sido enviada una trama con los datos de aceleración y tiempo. La demora en la conexión a la red produce un retardo en la transmisión de los datos y cada trama se demora un tiempo considerable en transmitirse, lo que se traduce en la recepción de tasa de muestreo con importantes vacíos. La alternativa de almacenar varias tramas antes de iniciar una conexión para subsanar lo anterior no fue analizada en este proyecto, porque el retardo asociado a ese proceso invalida el módulo para el envío de información para alerta temprana.

En consecuencia, como la tasa de muestreo que se recibe no contiene datos suficientes y no permite un análisis acabado, se omite un análisis tan profundo como el de la seccion previa para la transmisión mediante GPRS.

7.3. Alerta temprana.

Para realizar una prueba de lo que se concluye en el capítulo 5, se hace el mismo análisis de dicho capítulo a datos transmitidos por Zigbee y registrados en una base de datos, datos que son enviados por un waspmote ubicado en una mesa vibradora del departamento de Obras Civiles de la UTFSM, esta mesa simula el desplazamiento que se produce en una estructura provocado por un sismo, en este caso se cargan datos de la onda S del terremoto de 1985 producido en Chile. Aunque la mesa se mueve por desplazamiento en un solo eje, de igual forma se simula el movimiento que se tendría frente a un terremoto y con ello la aceleración aproximada que se produce. En la siguiente figura se muestra el resultado de la aceleración neta medida y el umbral producido:

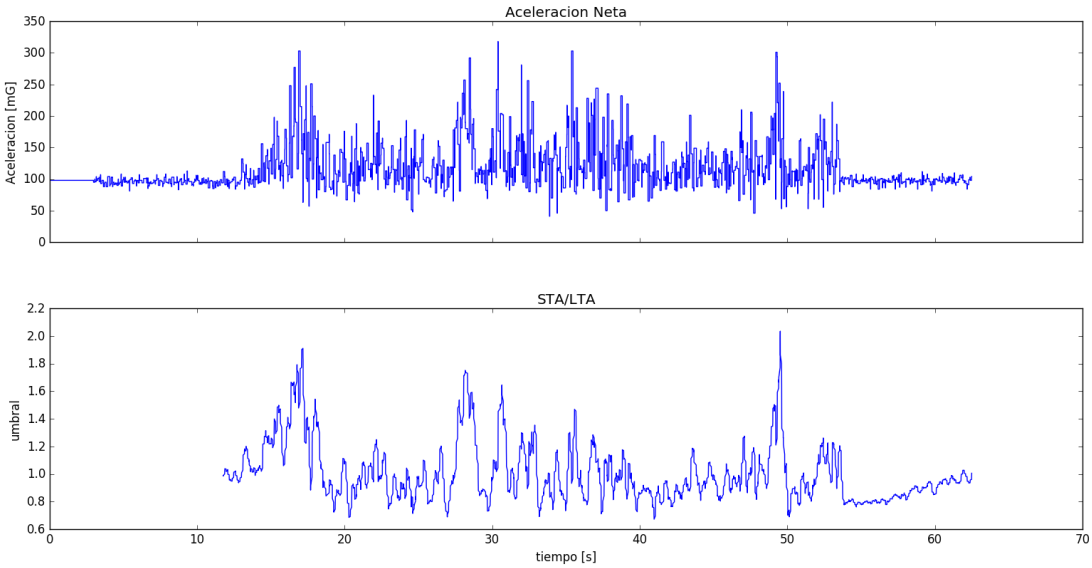


Figura 7.10: Aceleración registrada en mesa vibradora y umbral producido. (Elaboración propia)

En el capítulo 5 se menciona que el valor del umbral a superar para detectar un movimiento significativo es de 1.2, en el caso de este experimento se aprecia que en el instante que se registra una aceleración neta considerable, se supera dicho valor del umbral. Por lo que gracias al algoritmo estudiado se logra detectar la onda, discriminando el ruido que hay al principio.

Hay que considerar que en este experimento, los datos cargados corresponden a la onda S producida por el terremoto, por lo que no se logra comprobar que se detecta una

onda P, ya que en los datos no existe tal onda, pero de igual forma el umbral logra detectar el comienzo de la onda S.

Es importante destacar también que para generar una alerta temprana, no se debe considerar la superación del umbral en un solo mote, sino que debe ser el de varios motes conectados a la red, por ejemplo, de 3 a más motes ubicados en la misma zona geográfica (en la misma región) que superen tal umbral. Con esto se evitaría tener falsos positivos.

7.4. Caracterización.

Con las transmisiones y registros anteriores se procede a caracterizar cada uno con diferentes ventanas deslizantes. Las características descriptivas son mencionadas en las secciones 7.1 y 7.2. El objetivo ahora es poder modelar cada registro según su función de correlación y normalización que más se adapte al evento.

Cada figura en esta sección contiene el registro original, el registro con la transformada Wavelet, su función de autocorrelación normalizada y la función de normalización ρmax[20], todas con una ventana correspondiente al 1% de las muestras por decisión propia.

7.4.1. Ruido

Como se muestra en la figura 7.1, se realizan mediciones con el transmisor estático, lo que permite discriminar el ruido. El registro posee 5576 muestras, como el largo de la ventana (N) no posee un cálculo que permita elegir el valor óptimo, se decide para efectos de este experimento utilizar el 1% de la cantidad de datos del registro, que corresponde a N=56 aproximadamente (Ver página 29).

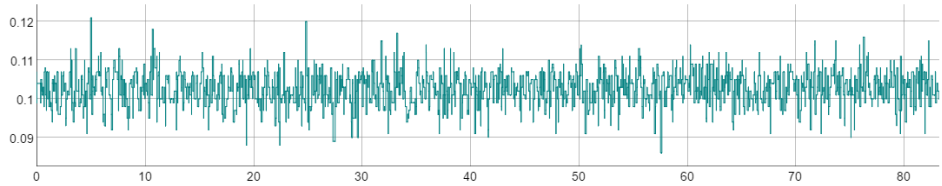


Figura 7.11: Registro original de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia)

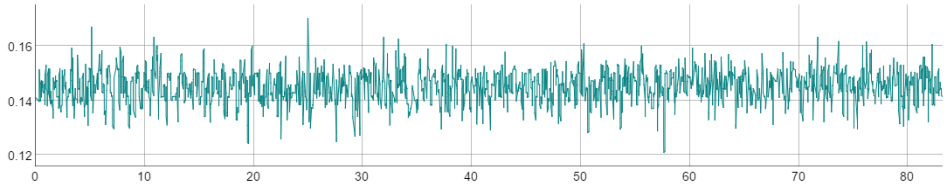


Figura 7.12: Registro con transformada Wavelet de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia)

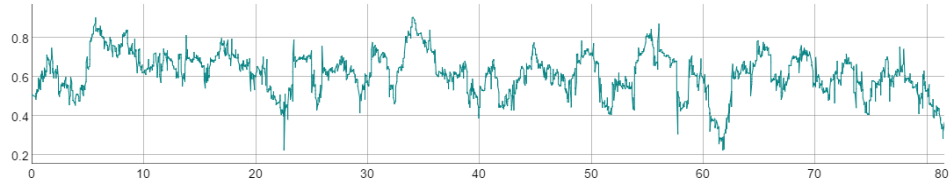


Figura 7.13: Autocorrelación de Registro con transformada Wavelet de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia)

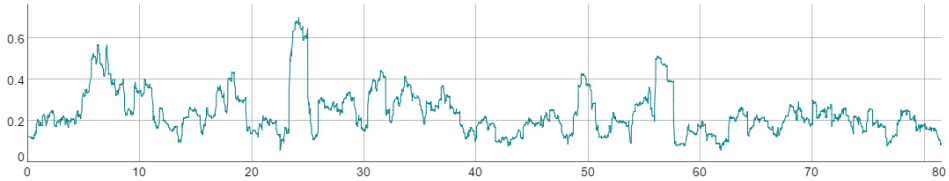


Figura 7.14: Registro con transformada Wavelet normalizada con ρmax de la medición con el transmisor estático. (Elaboración propia)

El resultado final de la normalización permite identificar una señal donde se puede apreciar de mejor manera los máximos del ruido en el transmisor.

7.4.2. Transmisión con línea vista

Como se muestra en la figura 7.4, se realizan mediciones con el transmisor en línea vista con el receptor a una distancia de 75 [m]. El registro posee 4248 muestras, lo que corresponde a una ventana N=43 aproximádamente.

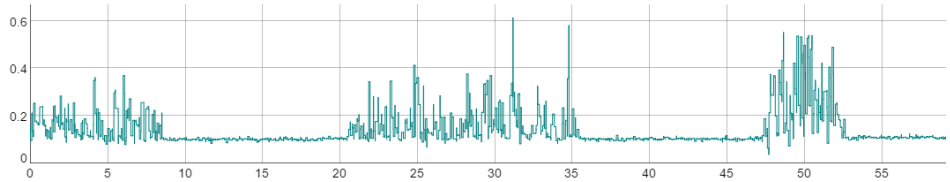


Figura 7.15: Registro original de transmisor en línea vista con receptor. (Elaboración propia)

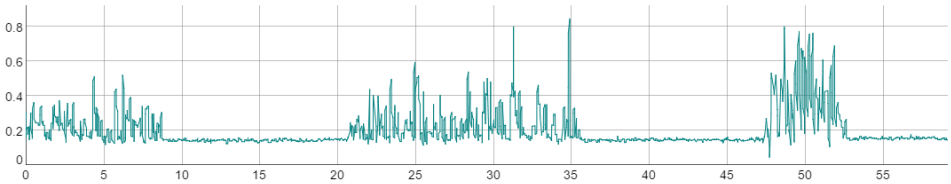


Figura 7.16: Registro original con tranformada Wavelet de transmisor en línea vista con receptor. (Elaboración propia)

.

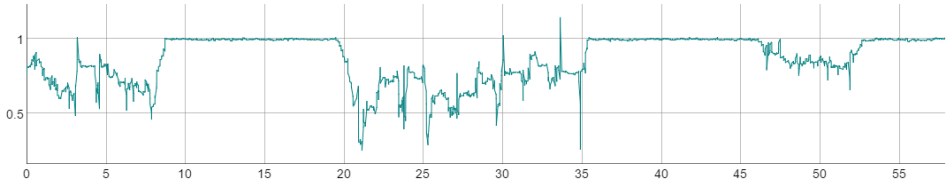


Figura 7.17: Autocorrelación de Registro original con tranformada Wavelet de transmisor en línea vista con receptor. (Elaboración propia)

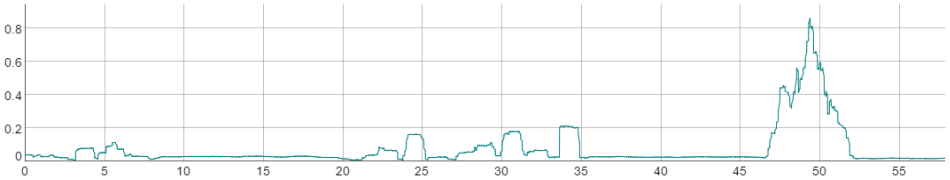


Figura 7.18: Registro original con tranformada Wavelet normalizado con ρmax. (Elaboración propia)

La función de autocorrelación, al estar normalizada debe tener valores entre 0 y 1. En este caso se puede ver un valor extremo que supera el valor máximo, esto se debe a la

aproximación y la variación decimal que se utiliza en la aplicación. Este valor queda completamente eliminado cuando se realiza la normalización con ρmax.

7.4.3. Transmisión sin línea vista

Como se muestra en la figura 7.6, se realizan mediciones con el transmisor sin línea vista con el receptor a una distancia de 75 [m]. El registro posee 3664 muestras, lo que corresponde a una ventana N=37 aproximádamente.

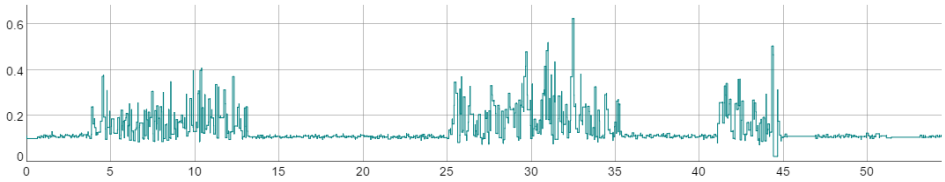


Figura 7.19: Registro original de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia)

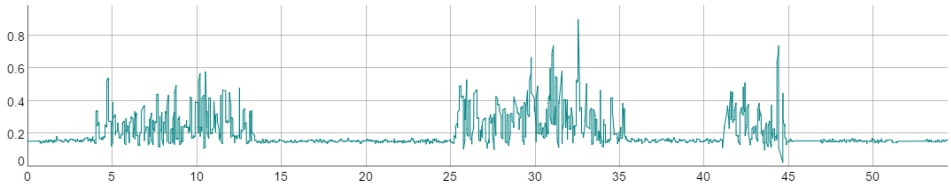


Figura 7.20: Registro original con transformada Wavelet de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia)

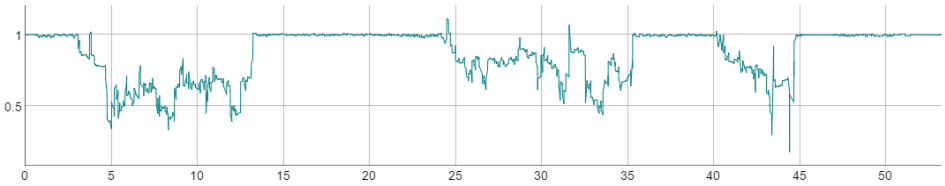


Figura 7.21: Autocorrelación de Registro original con transformada Wavelet de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia)

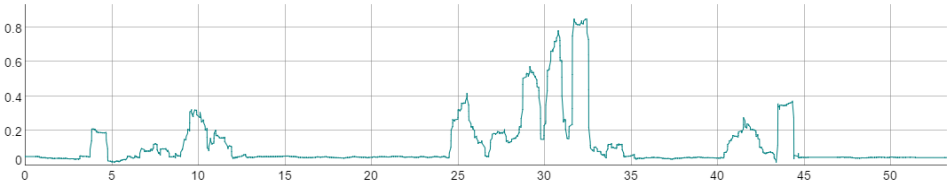


Figura 7.22: Registro original con transformada Wavelet normalizado con ρmax de transmisor sin línea vista con receptor. (Elaboración propia)

Se puede ver un buen comportamiento de la normalización, lo que facilitaría el reconocimiento de patrones.

7.4.4. Registro sin transmisión.

Como se muestra en la figura 7.7, se realizan medicones sin transmisión, es decir, almacenadas en el mismo nodo. El registro posee 2932 muestras, lo que corresponde a una ventana N=30 aproximádamente.

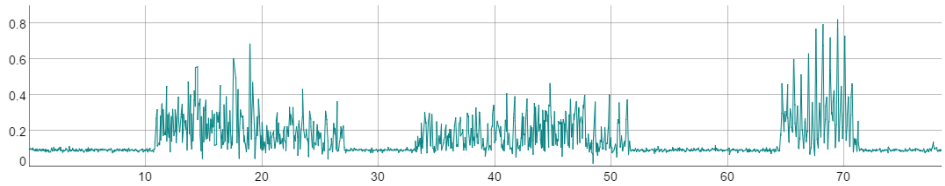


Figura 7.23: Registro original de medición sin transmisión. (Elaboración propia)

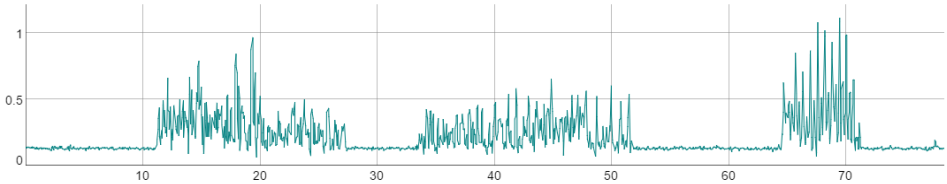


Figura 7.24: Registro original con transformada Wavelet de medición sin transmisión. (Elaboración propia)

.

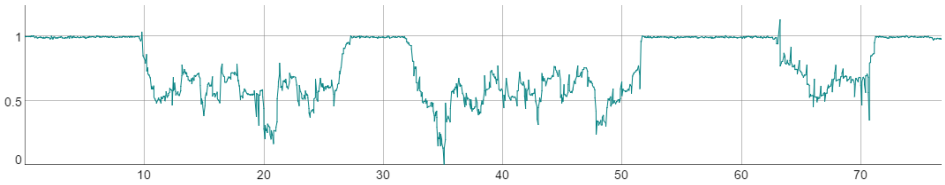


Figura 7.25: Autocorrelación de Registro original con transformada Wavelet de medición sin transmisión. (Elaboración propia)

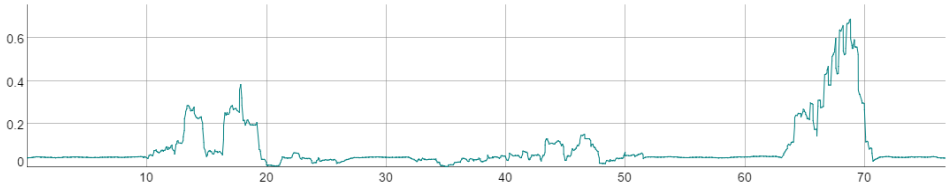


Figura 7.26: Registro original con transformada Wavelet normalizado con ρmax de medición sin transmisión. (Elaboración propia)

7.4.5. Transmisión mediante GPRS.

Como se menciona en la página 74, no se tiene una secuencia de datos recuperados de la transmisión GPRS que representen un intervalo donde se pueda extraer información útil. La forma correcta para abordar esta transmisión es identificar el tiempo que se demora el establecimiento de conexión y manipular las bibliotecas de Libelium para obtener un código de transmisión GPRS óptimo. Debido a que la envergadura de este análisis escapa al al alcance de este proyecto se deja este análisis para desarrollos futuros.

7.5. Registros de sismo histórico.

Las mediciones y caracterizaciones anteriores no corresponden a registros sísmicos verdaderos y sólo se utilizan para analizar el comportamiento de la caracterización. Es por ello que se necesita contar con registros de la aceleración de sismos conocidos y utilizar los procedimientos descritos.

La Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC) posee registros de los eventos sísmicos más importantes, estos poseen la aceleración medida en distintas bases a lo largo del país. En esta investigación se utilizan los registros del Terremoto 8.8 Mw del 27 de Febrero [44], específicamente de la base de Constitución.

A continuación, se presentan las mediciones en los 3 ejes. Después se trabaja con la aceleración neta.

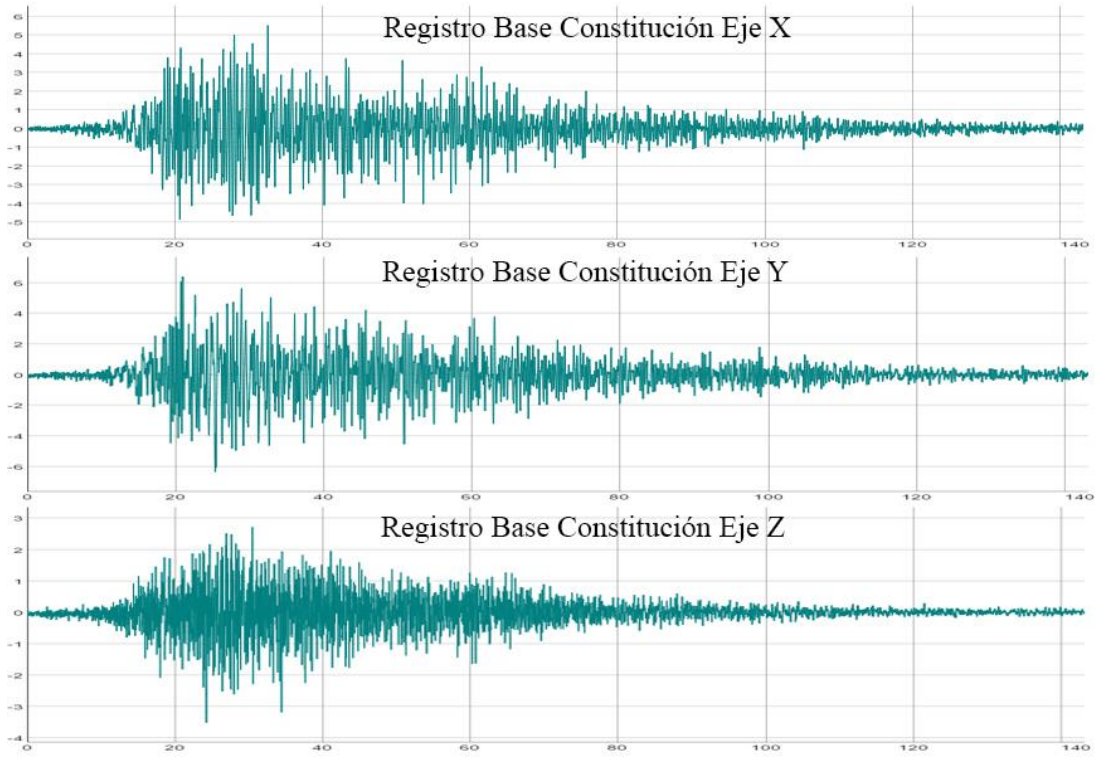


Figura 7.27: Registro original base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010. (Elaboración propia)

El registro es de 28.655 muestras y se utiliza el 1% para determinar que el largo de la ventana es 287.

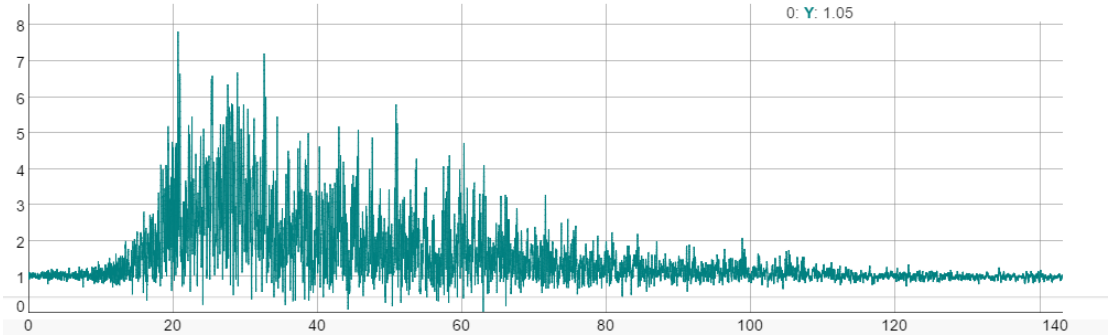


Figura 7.28: Registro neto de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010. (Elaboración propia)

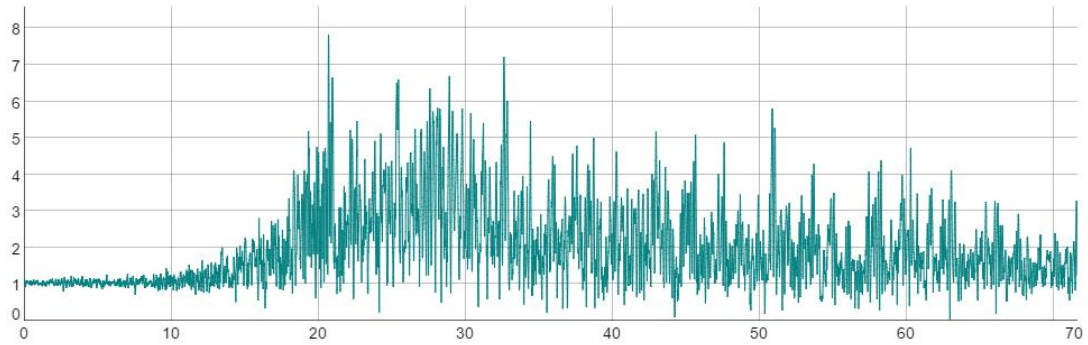


Figura 7.29: Registro neto de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 con transformada Wavelet. (Elaboración propia)

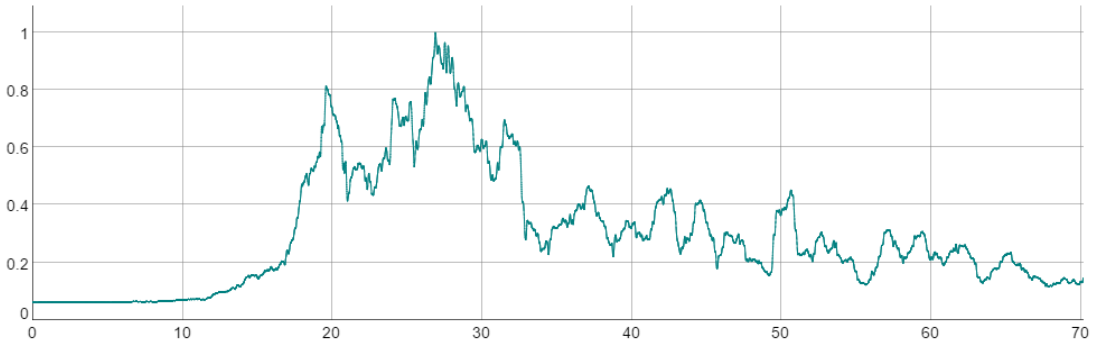


Figura 7.30: Registro neto de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 con transformada Wavelet normalizado con ρmax. (Elaboración propia)

En el registro se puede ver que se rescata la forma del evento sísmico producido en Constitución. Para completar el análisis, se emplea la normalización con ρmax y ventana N=287 para cada eje.

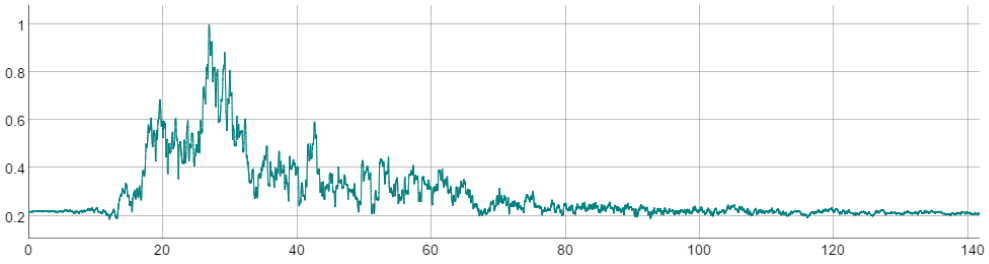


Figura 7.31: Registro eje X de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 normalizado con ρmax. (Elaboración propia)

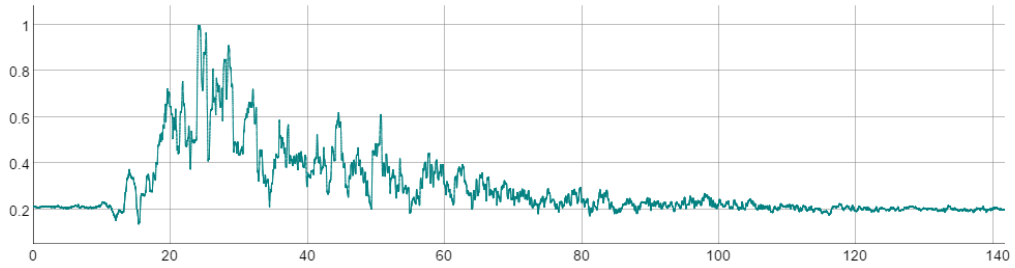


Figura 7.32: Registro eje Y de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 normalizado con ρmax. (Elaboración propia)

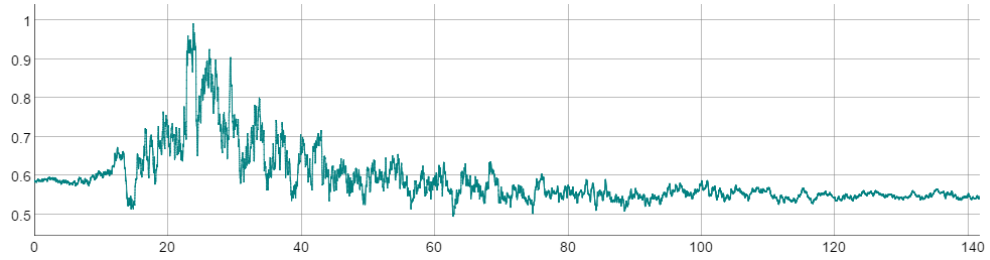


Figura 7.33: Registro eje Z de la base Constitución del terremoto 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010 normalizado con ρmax. (Elaboración propia)

En el análisis por eje se pueden obtener mejores resultados de análisis, debido a que es posible identificar la aparición de la onda P o S en sus respectivos tiempos. El problema recae en la velocidad de transmisión para poder realizar lo mismo con los nodos Libelium.

7.6. Mesa vibradora.

Como se presenta en la sección 7.3 de Alerta temprana, se realiza una simulación en la mesa vibradora de la Universidad Técnica Federico Santa María. Este registro tiene 4608 muestras, lo que entrega una ventana N=47.

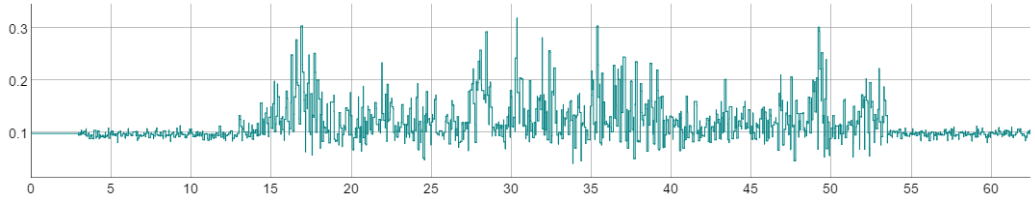


Figura 7.34: Registro neto de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia)

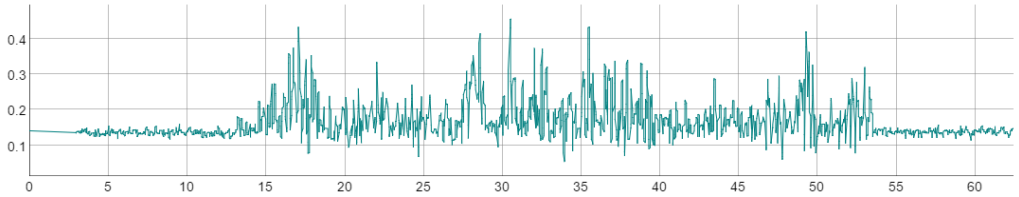


Figura 7.35: Registro neto con transformada Wavelet de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia)

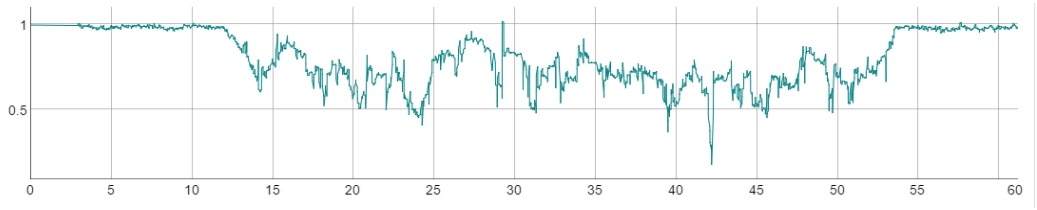


Figura 7.36: Autocorrelación de registro neto con transformada Wavelet de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia)

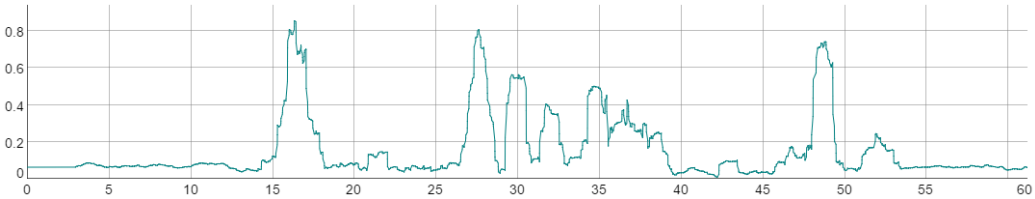


Figura 7.37: Registro neto con transformada Wavelet normalizado con ρmax de simulación en mesa vibradora. (Elaboración propia)

Capítulo 8: Conclusiones.

La red WSN implementada mediante tecnología Zigbee consigue una tasa de transmisión eficiente para el objetivo de la investigación, siendo esta una red escalable para el monitoreo y caracterización de un evento sísmico, pero no apropiada para la alerta temprana, debido a que la capacidad de procesamiento del nodo transmisor es deficiente. Esta red es escalable, debido a su rango de alcance y a la posibilidad de contar a futuro con un Gateway o Meshlium con mejores capacidades para desarrollar una red con múltiples nodos, pero hay que considerar que el receptor debe tener una conexión a internet, por lo que dicha red no permite comunicación en zonas remotas. Por otro lado, Meshlium puede contar con diferentes tecnologías para la transmisión de la información, con lo cual se puede enviar directamente los datos a un servidor.

La red WSN implementada mediante tecnología GPRS no consigue - en el desarrollo de este proyecto - una tasa de transmisión de tramas suficiente para obtener datos que permitan analizar la viabilidad de realizar alerta temprana ni la caracterización de eventos sísmicos. Es importante destacar que la tasa de transmisión es teóricamente mejorable, pero no se consigue por el alcance y los recursos disponibles de este proyecto, por lo que se deja como trabajo a futuro optimizar la comunicación. Los autores recomiendan almacenar la información en un archivo en una memoria SD y posteriormente enviarlo por GPRS para subsanar la baja tasa efectiva de transmisión de tramas GPRS, lo que permite analizar los datos con fines de monitoreo, pero no de alerta temprana para eventos sísmicos.

Para una red WSN de monitoreo y caracterización de eventos sísmicos, es importante contar con un servidor web encargado de almacenar datos y que tenga la capacidad de procesamiento para alertar y/o caracterizar. Además debe poseer alta disponibilidad, para tener un rápido acceso a la información. También la página web desarrollada debe tener facilidad de uso, ser intuitiva para el usuario y mostrar de la mejor manera los datos para su posterior análisis.

Una red de este tipo no posee las características suficientes para generar una alerta temprana, ya que para el algoritmo estudiado en esta investigación es necesario que cada nodo se encuentre transmitiendo constantemente, lo que afecta energéticamente a una red implementada en zonas remotas. Cabe mencionar que aunque esta red esté conectada a una red eléctrica, sin problemas de energía y en constante transmisión, no asegura que se genere la alerta temprana, sino que se necesita poner a prueba dicha red frente a un sismo real, para

comprobar que la implementación funciona correctamente, lo que se deja como proyecto a futuro.

Con respecto a la caracterización, la página web cumple con el alcance de la investigación, debido a que logra emplear los algoritmos estudiados, es decir, algoritmo de filtrado mediante transformada Wavelet, autocorrelación y normalización. Lo anterior permite eliminar ruido y rescatar una señal más aproximada a la provocada por un evento sísmico, donde se puede reconocer de forma eficiente una onda P o S. Cabe destacar que la información desplegada en la aplicación web es solo descriptiva, lo que puede servir para proyectos futuros interesados en comparar los datos con eventos similares para una búsqueda de patrones que permita reconocer de mejor manera un sismo.

Bibliografía

[1] H. Zheng, G. Shi, T. Zeng, and B. Li, "Wireless earthquake alarm design based on MEMS accelerometer," *2011 Int. Conf. Consum. Electron. Commun. Networks, CECNet 2011 - Proc.*, pp. 5481–5484, 2011.

[2] A. Z. Vizuete, I. P. Llopis, C. P. Salvador, and M. E. Domingo, "Sistema Distribuido de Detecci??n de Sismos Usando una Red de Sensores Inal??mbrica para Alerta Temprana.," *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 12, no. 3, pp. 260–269, 2015.

[3] "Global Hazards Atlas." [Online]. Available: http://atlas.pdc.org/atlas/.

[4] Libelium, "Wireless Sensor Networks with Waspmote and Meshlium Meshlium," 2014.

[5] A. N. Service, "Emergency Warning System," vol. 2032, no. 2011, pp. 1–3, 2013.

[6] S. M. de I. Sísmica, "Sismicidad." [Online]. Available: http://www.smis.org.mx/sismicidad.html.

[7] "JMA." [Online]. Available: http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew1.html.

[8] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Welsh, O. Marcillo, J. Johnson, M. Ruiz, and J. Lees, "Deploying a wireless sensor network on an active volcano," *IEEE Internet Comput.*, vol. 10, no. 2, pp. 18–25, 2006.

[9] M. Welsh, G. Werner-Allen, K. Lorincz, O. Marcillo, J. Johnson, M. Ruiz, and J. Lees, "Deploying a Sensor Network on an Active Volcano," *Science (80-.).*, no. April, pp. 18–25, 2006.

[10] A. Trnkoczy, "Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm," *New Man. Seismol. Obs. Pract. 2*, pp. 1–80, 2012.

[11] G. W. Challen, "Data Fidelity and Resource Management for Data-Rich Sensor Networks," no. May, 2010.

[12] R. Lahusen and B. Shirazi, "Design of smart sensing component for volcano monitoring," *4th Int. Conf. Intell. Environ. (IE 08)*, pp. 1A2–1A2, 2008.

[13] W.-Z. Song, "Air-dropped Sensor Network for real-time high-fidelity volcano monitoring," 2009.

[14] D. Funkhouser, "Seismometer Puts Earthquakes Online at Kent School," 2011. [Online]. Available: http://blogs.ei.columbia.edu/2011/12/02/seismometer-puts-earthquakes-online-at-kent-school/.

[15] R. L. Cueva, S. Member, and R. G. Orquera, “Towards a New Volcano Monitoring System Using Wireless Sensor Networks,” pp. 1–5, 2012.

[16] F. Finazzi, “Smartphone-based sensor networks and some statistical challenges : the Earthquake Network Android application,” no. November, 2013.

[17] P. Bormann, “Seismic signals and noise,” *Bormann, P.(ur.)*, vol. 1, pp. 1–34, 2002.

[18] C. C. S. N. de la U. de Chile, “No Title,” 2015. [Online]. Available: http://www.uchile.cl/noticias/117734/smartphones-se-usaran-para-alerta-temprana-de-sismos.

[19] “USGS with CSN in Chile.” [Online]. Available: http://www.uchile.cl/noticias/117734/smartphones-se-usaran-para-alerta-temprana-de-sismos.

[20] C. Jaramillo, R. León, R. Lara, D. Benítez, and M. Ruiz, “Caracterización de señales sísmicas del Volcán Cotopaxi utilizando estimadores espectrales clásicos y de máxima entropía,” *Maskana*, pp. 141–153, 2016.

[21] D. Stewart, “How to Choose A Sensible Sampling Rate,” 2002. [Online]. Available: http://www.embedded.com/design/configurable-systems/4006414/How-to-Choose-A-Sensible-Sampling-Rate.

[22] M. Belge and E. L. Miller, “Sliding window RLS-like adaptive algorithm for filtering alpha-stable noise,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 86–89, 2000.

[23] C. Jaramillo, R. León, R. Lara-Cueva, D. S. Benítez, and M. Ruiz, “A new structure for sequential detection and maximum entropy spectral estimator for characterization of volcanic seismic signals,” *2014 IEEE Latin-America Conf. Commun. IEEE LATINCOM 2014*, no. NOVEMBER, 2014.

[24] A. Heinz and R. Mc, “ReDSIsMoS : RED DE SENSORES INALÁMBRICOS DE BAJO COSTO PARA EL Agradecimientos,” 2015.

[25] Libellium, “Waspmote datasheet,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, p. 160, 1989.

[26] STMicroelectronics, “LIS331DLH MEMS Accelerometer Data Sheet,” no. July, pp. 1–38, 2009.

[27] T. Guide, “Waspmote.”

[28] N. Guide, “Waspmote ZigBee,” *Network*.

[29] U. Guide, “Waspmote IDE.”

[30] “Ejemplos Libelium.” [Online]. Available:

http://www.libelium.com/development/waspmote/examples.

[31] "XCTU." [Online]. Available: http://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001458-13/default.htm.

[32] Libelium, "Waspmote Data Frame," p. 18, 2013.

[33] G. Pro and P. Guide, "Waspmote GSM / GPRS GPRS PRO Programming Guide," *Libelium Comun. Distrib. S.L*, pp. 2–35, 2013.

[34] USGS, "Earthquake Hazard Program." [Online]. Available: http://earthquake.usgs.gov/.

[35] JMA, "Japan Meteorological Agency | Earthquake Information." [Online]. Available: http://www.jma.go.jp/en/quake/.

[36] CSN, "Informe de Sismo." [Online]. Available: http://www.sismologia.cl/.

[37] U. de Coruña, "Ondas Sísmicas." [Online]. Available: http://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Investigacion/Terremotos/ondas_s%EDsmicas.htm.

[38] RSNC, "Conceptos Básicos Sismos." [Online]. Available: http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/material-educativo/conceptos-basicos.

[39] U. de Chile, "Terremotos de Chile." [Online]. Available: http://terremotos.ing.uchile.cl/.

[40] P. Andrés and L. Castillo, "Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Y Productividad En La Construcción," 2007.

[41] M. R. Agius, "Automatic earthquake detection and localisation from a three-component single-station," no. March, p. 191, 2007.

[42] R. Zwlenovsky and R. D. León, "Detección de objetivos en radar utilizando un estimador espectral de máxima entropía," 1993.

[43] S. Kouro, R. Rodrigo, and a A. De Fourier, "Tutorial introductorio a la Teoría de Wavelet," pp. 1–8, 2002.

[44] R. L. R. Boroschek, P. Soto R., "INFORME RENADIC 10/05 Rev. 2," *Univ. chile Fac. ciencias físicas y matemáticas Dep. Ing. Civ.*, 2010.