

DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS

SEISMIC SIGNAL ACQUISITION DEVICE

Camila Alejandra Bonilla Segura, Yeison Alberto González Bernal

Resumen: Este artículo presenta el diseño y desarrollo de un dispositivo capaz de detectar señales que permitan afirmar cuando sucede el fenómeno natural sismo por medio de la escala de Mercalli Modificada (MMI); el sistema cuenta con una tarjeta de adquisición principal a la cual van añadidos varios sensores que se encargan de recolectar la información y otros de transmitirla, este dispositivo fue caracterizado en una carcasa de material ABS, se hicieron las pruebas con una estabilidad fija y en movimiento para escalar los datos y su publicación en un servidor web. En primer momento, se hace una revisión de estado del arte, para implementar un sistema de adquisición de señales sísmicas, con almacenamiento, comunicación y soporte de energía evaluando así, el desempeño de los parámetros enmarcados en la propuesta doctoral titulada “Sistema de gestión de alertas para predicción y detección de sismos”, en la que se necesita un dispositivo que almacene y envíe los datos detectados de las señales y su ubicación a un servidor en el cual serán tratados de acuerdo a sus objetivos posteriores.

Palabras clave: Datos, Sensores, Servidor, Sismos

Abstract: This article presents the design and development of a device capable of detecting signals that can be affirmed when the natural phenomenon occurs by means of the scale of Mercalli; the system has a main purchase card to which are added several sensors that are in charge of collecting the information and others to transmit it, this device was characterized in a case of material ABS, tests were performed with a

fixed and moving stability to scale the data and its publication on a web server. At first, a state of the art review is performed, to implement a system of seismic signal acquisition, with storage, communication and energy support thus evaluating, the performance of the parameters framed in the doctoral project proposal "Warning management system for prediction and detection of earthquakes", who needs a device that stores and sends the detected signal data and its location to a server where they will be treated according to their later targets.

Key Words: Data, Sensors, Server, Earthquakes.

1. Introducción

Los sismos, conocidos como movimiento brusco y repentino entre las capas tectónicas de la tierra, han provocado durante años algunos desastres, como daños materiales y muertes físicas. En Colombia, según el IDIGER (Instituto Distrital De Gestión De Riesgos Y Cambio Climático) hay tres niveles de amenaza determinados por el nivel histórico de sismicidad y probabilidad de ocurrencia en las regiones (bajo, intermedio y alto), por lo que determinó que el 83% de la población del país se encuentra ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta [1].

Por razones como esta, es necesario la implementación de una red para la detección de actividad sísmica que permita el monitoreo de las señales, pueda determinar y generar sistemas de alerta a la población, como lo hacen los sistemas de gestión implementados por Japón, el sistema de alerta temprana para sismos Earthquake Early Warning – EEW genera un mensaje de advertencia a todas las redes de comunicación del país, medios televisivos, móviles, sirenas, el cual es emitido principalmente por la Agencia Meteorológica de Japón, justo después de que se detecta un sismo [2].

El monitoreo de señales sísmicas ha ido tomando importancia por los daños que genera, mejorando así, con la implementación de sistemas que buscan tomar un registro y dar una

alerta a la comunidad, como lo presenta la propuesta doctoral “Sistema de gestión de alertas para predicción y detección de sismos” del profesor Darín Jairo Mosquera Palacios de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, que tiene como fin dar una alerta a la comunidad cuando ocurra un sismo, enviando los datos a las entidades encargadas en el menor tiempo posible, para poder efectuar de manera oportuna un buen control de la situación, de la misma manera, es importante una red comunitaria de monitoreo que permita hacer análisis casi en tiempo real que ayude a reducir los impactos de estos fenómenos, y para esto, es necesario desarrollar instrumentación sísmica de bajo costo, operabilidad, escalabilidad y de fácil adquisición.

De acuerdo a las necesidades presentadas en el proyecto del profesor, se realiza el diseño y desarrollo de un dispositivo de adquisición de señales, para llevarlo a cabo se tienen en cuenta las siguientes fases, en la fase conceptual se investiga sobre los diferentes escalas sísmicas, funcionamiento de los sensores, comunicación serial, I2C, además de la comunicación WiFi; la siguiente fase comprende la definición de requerimientos y la selección de componentes; en el diseño se aborda el diseño electrónico y la programación de las tarjetas Arduino Mega 2560 y Wemos D1 Mini a través de la plataforma IDE Arduino; la fase de desarrollo consiste en el montaje electrónico, la comunicación entre las tarjetas, pruebas y ajustes finales. Una vez culminado todo lo anterior, se procede a evaluar los resultados obtenidos mediante los requerimientos establecidos dentro del marco del proyecto “Sistema de gestión de alertas para predicción y detección de sismos”, verificando el correcto cumplimiento de estos.

2. Descripción de la alternativa

Los desastres naturales como los sismos son difíciles de predecir, para ello es importante tener un sistema de medida que permita monitorear y a futuro generar una alerta temprana para evitar alguna pérdida, en especial cuando se trata de vidas humanas; por esto, en el contexto de este proyecto, se diseña un dispositivo para un sistema de monitoreo de señales sísmicas el cual permite informar de manera inmediata los niveles de señales sensadas para que así se genere una alerta, se almacenen para evitar pérdida de datos y poder hacer un análisis de estas.

Para lograr la realización del dispositivo fue necesario la implementación de diferentes sensores a una tarjeta micro controlada, con diferentes instrumentos de medición para determinar las señales sísmicas como lo son acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, además cuenta con un módulo GPS para determinar ubicación, fecha y hora en tiempo real, un módulo WiFi que permite la comunicación con un servidor para la transmisión de los datos adquiridos, y un módulo de tarjeta SD que guarda los datos recolectados en un archivo para evitar pérdidas en caso de una desconexión al servidor.

3. Materiales y Métodos

La metodología implementada para el desarrollo del trabajo propuesto se describe en el diagrama de bloques de la Figura 1, donde se observa la estructuración planteada para la construcción del sistema, teniendo en cuenta que para todos los pasos mostrados en la figura se hizo una previa revisión conceptual de acuerdo a otros proyectos semejantes.

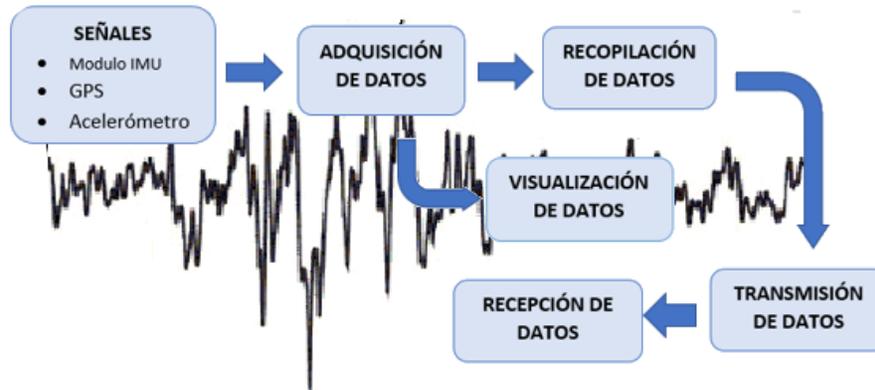


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema Fuente: Elaboración propia

3.1. Revisión estado del arte

Para la realización del dispositivo se toman como base conceptual varios proyectos semejantes, a continuación, se describen junto a su aporte dentro del desarrollo del dispositivo. El uso del celular para la generación de redes de detección de sismos se ha presentado ya en varios proyectos con el uso de sus acelerómetros internos, aunque no de la misma forma, en este dispositivo se hace uso del acelerómetro integrado en el celular para toma y verificación de pruebas, así como el manejo de los datos para identificar la escala en que se encuentra, proyectos como el “Earthquake Network” donde se implementa una red global de detección de terremotos en tiempo real basada en smartphones aprovechando el acelerómetro para detectar sismos, se envía una alerta a todos los smartphones que se encuentran en el área afectada por el sismo, y a los que no están demasiado cerca del epicentro se envía una alerta temprana [3],[4],[5],[6]; también se hace uso de los celulares en otros proyectos como el “Sistema Distribuido de Detección de Sismos Usando una Red de Sensores Inalámbrica para Alerta Temprana” donde se construye una red de acelerógrafos en una arquitectura jerárquica para alerta temprana en 3

niveles, primero los Smartphones (SPs) son usados como sensores y unidades de procesamiento que enviarán muestras cuando detecten un incremento de aceleración significativo que corresponda a un pico sísmico a un Servidor Intermedio (IS) correspondiente al Nivel 2 Cada IS debe identificar si ha existido verdaderamente un evento e inmediatamente notificar al usuario, y comunicar al Centro de Control (CC), finalmente, el CC, en el Nivel 3, suministrará información y generará alarmas a otros ISs que a su vez notificarán a sus respectivos SPs, a organismos encargados de la toma de decisiones y centros de ayuda [10].

Con respecto a otros sistemas ya implementados como el “Sistema de alerta temprana de sismos en Japón (Earthquake Early Warning - EEW)” donde los nodos sensores siempre miden la aceleración y la envían a la estación base, el programa de observación de terremotos obtiene el dato de aceleración a través de la estación y generan la información sísmica [7],[2]; de este proyecto se toma como principio el uso de la aceleración para la escala de los datos y el envío casi en tiempo real para generar información que permita dar una alerta, además, el uso de acelerómetros de tres ejes como en este caso, ha sido usado también en aplicación de detección de sismos como en “terremoto de alerta temprana para las líneas de transporte”, son estaciones individuales equipadas con acelerómetros 3D detectan las ondas P, se calcula la magnitud del sismo y en el plazo de 4 segundos para transmitir una señal de aviso por radio a los sitios en peligro dentro de un rango de unos 200 km [9].

Por otra parte, y en cuanto a comunicación se tiene en cuenta el proyecto “Sensor de activación de la web aplicada (SWE) a un sistema de alerta temprana de terremotos (SOS)” para la comunicación WiFi entre la tarjeta de adquisición y el servidor web, ya que el proyecto se centra en el acoplamiento del tipo de comunicación a los requisitos del sistema:

datos del sensor, el acceso rápido a los datos, la comunicación en tiempo real y notificación inmediata por medio de un sistema basado en internet [8]. De la misma manera, la infraestructura cibernética Quake-Catcher Network (QCN) monitorea terremotos a gran escala mediante el uso de equipos de voluntarios. Un cliente BOINC en QCN controla el acelerómetro en el ordenador del voluntario que se utilizan para controlar y capturar movimientos sísmicos, cada vez que se detecta fuerte movimiento del suelo por el acelerómetro, el cliente BOINC envía un paquete llamado mensaje de goteo al servidor QCN [11]. A diferencia del último proyecto mencionado el dispositivo de adquisición de señales sísmicas, si envía los datos de manera constante al servidor, no solo para alertar, sino para mantener un monitoreo.

También, se analiza la utilidad de PRESTo (Sistema de alerta temprana evolutivo y de comportamiento) que es una plataforma de software para la alerta temprana de terremotos regionales que integra algoritmos desarrollados recientemente para terremotos en tiempo real, ubicación y estimación de magnitud en un paquete altamente configurable y fácilmente portátil [15]; en el desarrollo del dispositivo se tiene en cuenta el envío de un paquete completo al servidor con los datos tomados de ubicación, tiempo, aceleración y escala.

Teniendo como proyección la realización de una red de dispositivos, es importante que estos sean de bajo costo y cada uno tenga integrado el sensado, la escala, el almacenamiento y la comunicación, como se menciona anteriormente, estas características se tienen en cuenta en otros proyectos como “Diario de Red y Aplicaciones Informáticas” donde se desarrolla sistemas de alerta temprana, cada nodo actúa como una unidad de detección de sismología y está hecha de bajo costo, componentes off-the-shelf, cada unidad se compromete al

procesamiento de sismología de datos, análisis, archivo, y la comunicación de datos y mensajes de alerta temprana, también se menciona en el proyecto que el costo sea bajo hace que se pueda crear una red de datos más grande (10-100) en comparación a una estación sismológica, dato que se tiene en cuenta para el desarrollo del dispositivo[12]. De la misma manera, se tiene en cuenta el enfoque para validar alertas proporcionadas por un sistema de alerta temprana (SAT) para la monitorización estructural implementado a través de nodos de sensores múltiples de bajo costo, los resultados de esa estrategia demuestran la idoneidad de la solución propuesta en el marco de la elaboración de estrategias de múltiples sensores de bajo coste para la alerta temprana de comportamientos anómalos estructurales [14].

3.2. Escalas y aceleración

Para el manejo de los datos, es necesario tomar una escala de referencia para poder relacionarlos a un nivel sísmico con respecto al movimiento simulado, en este caso, se hace uso de la escala de Mercalli Modificada (MMI) ya que sus niveles tienen una relación directa con valores de aceleración, como se muestra en la figura 2, siendo PGA (Peak Ground Acceleration) la aceleración máxima del terreno y $1\text{Gal}=1\text{cm}/\text{Seg}^2$, la gravedad de $9,81\text{m}/\text{S}^2$ por lo que 10 Gals son aproximadamente el 1% de la gravedad. Esta escala trata de medir no solo el terremoto mismo, sino su efecto en las personas, se designa el nivel V si tiene la intensidad suficiente para ser percibido por la mayoría, causar daños en los vidrios y otros elementos; en el nivel 10, un sismo causa daños a estructuras y la destrucción de algunas de ellas [16].

Escala de Mercalli Modificada	
Intensidad	PGA (gal)
I	<1
II	1 --2
III	2-5
IV	5-10
V	10-25
VI	25-50
VII	50-100
VIII	100-250
IX	250-500
X	>500

Figura 2. Escala de Mercalli Modificada Fuente: Elementary Seismology by C.F. Richter, Published by W.F. Freeman. [17],[18],[19]

Así mismo, se puede relacionar con un rango aproximado en las magnitudes de la escala de Richter, como se muestra en la figura 3, teniendo en cuenta que la magnitud se obtiene de una ecuación logarítmica en la que necesita parámetros de distancia con respecto al epicentro.

Escala de Intensidad Mercalli	Magnitud
I	1.0 - 3.0
II - III	3.0 - 3.9
IV - V	4.0 - 4.9
VI - VII	5.0 - 5.9
VII - IX	6.0 - 6.9
VIII o más	7.0 o más

Figura 3. Relación escala de Mercalli y escala de Richter Fuente:

<https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/magnitud-intensidad-y-aceleracion/#prettyPhoto> [20]

3.3. Adquisición de señales

Para la captura de las señales se utilizaron distintos componentes los cuales se describen a continuación, que permiten la medición de las variables de manera triaxial sobre la base fija, todo esto acoplado a una tarjeta Arduino MEGA 2560 y una batería capaz de alimentar el sistema; el montaje de estos componentes va sobre una placa base que sostiene a la tarjeta y sensores que realizan la adquisición de datos, este sistema va integrado en una carcasa plástica elaborada en una impresora 3D.

- **Módulo IMU GY-86**

Teniendo el módulo GY-86, se realizan las conexiones respectivas del módulo al Arduino UNO conociendo que su medio de comunicación es I2C (Inter Integrated Circuits), en este módulo vienen integrados 3 sensores (Figura 4); Acelerómetro y giroscopio MPU6050, Magnetómetro HMC5883L y barómetro MS561, estos dos últimos no se tiene en cuenta dentro de las necesidades del proyecto.[21],[22],[23].

acelerometro:	x:764	y:16144	z:-1860	giroscopio:	x:-679	y:-107	z:148
acelerometro:	x:892	y:16220	z:-1832	giroscopio:	x:-474	y:-134	z:105
acelerometro:	x:680	y:16120	z:-1828	giroscopio:	x:-431	y:-150	z:42
acelerometro:	x:724	y:16180	z:-1860	giroscopio:	x:-682	y:-109	z:183
acelerometro:	x:656	y:16132	z:-1784	giroscopio:	x:-342	y:-145	z:48
acelerometro:	x:668	y:16128	z:-1984	giroscopio:	x:-510	y:-94	z:103
acelerometro:	x:760	y:16280	z:-1904	giroscopio:	x:-500	y:-128	z:135
acelerometro:	x:696	y:16204	z:-1920	giroscopio:	x:-435	y:-124	z:53
acelerometro:	x:744	y:16156	z:-1836	giroscopio:	x:-871	y:-82	z:148
acelerometro:	x:780	y:16052	z:-1784	giroscopio:	x:-396	y:-145	z:70

Figura 4. Prueba inicial IMU GY-86 Fuente: Elaboración Propia

- **GPS NEO 7M**

Este módulo funciona mediante comunicación serial, se utiliza para obtener datos de ubicación del dispositivo, así como la hora y fecha en tiempo real, este módulo tiene diferentes protocolos NMEA (National Marine Electronics Association), se escoge para el sistema usar el GPRMC (Figura 5), ya que este, proporciona una mayor cantidad de datos

aprovechables para el proyecto, cada GPS maneja su propia velocidad de transmisión, en éste caso se maneja una velocidad de 9600 Baudios de acuerdo a la hoja técnica del módulo [24].

```

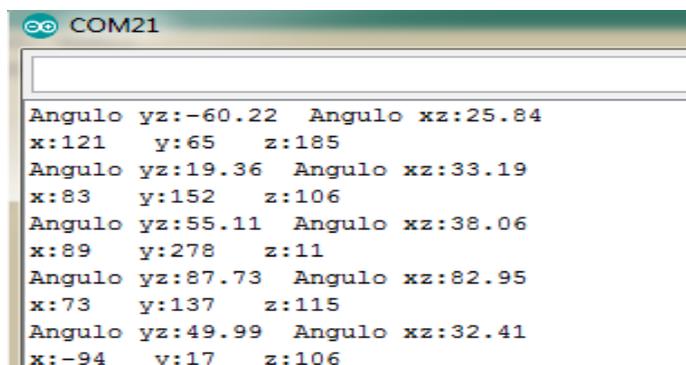
$GPGSV,3,2,12,18,11,245,15,20,10,152,,22,25,309,20,26,75,335,33*7C
$GPGSV,3,3,12,27,21,188,,29,08,064,42,31,27,008,32,32,45,068,41*7F
$BDGSV,1,1,00*68
$GNRMC,044811.000,A,0438.1985,N,07407.6772,W,0.00,0.00,170819,,,A*66
$GNVIG,0.00,1,,M,0.00,N,0.00,K,A*23
$GNZDA,044811.000,17,08,2019,00,00*44
$GPTXT,01,01,01,ANTENNA OK*35
$GNGGA,044812.000,0438.1985,N,07407.6772,W,1,06,2.0,2594.8,M,0.0,M,,*57
$GNGLL,0438.1985,N,07407.6772,W,044812.000,A,A*54

```

Figura 5 Prueba inicial GPS NEO 7M Fuente: Elaboración Propia

- **Acelerómetro MMA7361**

Este sensor permite la comparación y validación de los datos del acelerómetro que está incorporado en el módulo GY-86 mencionado anteriormente, este tiene la posibilidad de ser configurado entre ± 1.5 g y ± 6 g ($1g \approx 9,81$ m/s²), para este caso se usó ± 1.5 g teniendo en cuenta que el acelerómetro del MPU6050 maneja una escala de 2 g [25].



```

COM21
Angulo yz:-60.22 Angulo xz:25.84
x:121 y:65 z:185
Angulo yz:19.36 Angulo xz:33.19
x:83 y:152 z:106
Angulo yz:55.11 Angulo xz:38.06
x:89 y:278 z:11
Angulo yz:87.73 Angulo xz:82.95
x:73 y:137 z:115
Angulo yz:49.99 Angulo xz:32.41
x:-94 y:17 z:106

```

Figura 6. Muestreo de datos acelerómetro variando inclinación. Fuente: Elaboración propia

3.3. Transmisión y recepción de datos

En esta etapa se toman los datos que son capturados en el Arduino, se envían al módulo Wemos D1 mini que se va a encargar de transmitirlos al servidor y realizar un almacenamiento de respaldo en una tarjeta SD, adicionalmente se realiza la publicación de los datos en una pantalla TFT de 2,4" [26].

- **Wemos D1 Mini**

Es una tarjeta de desarrollo especialmente orientada al Internet de las cosas (IoT). Está basado en el SoC (System on Chip) ESP8266, un chip altamente integrado, integra un procesador con Arquitectura de 32 bits y conectividad WiFi. Para hacer uso del módulo es necesario programarlo en la plataforma Arduino IDE, dónde se especifica que se va a enviar al servidor, se realiza comunicación serial con el Arduino UNO quien le transmite los datos de las señales adquiridas para que la tarjeta Wemos las pueda enviar y al mismo tiempo almacenarlas en un archivo .txt mediante un módulo de tarjeta SD por comunicación SPI [27].

3.4. Diseño carcasa

Se realiza el diseño de una caja en el programa SketchUp, cuenta con los espacios y dimensiones requeridas, con el espacio de la pantalla, el periférico para cargar la batería, para colocar y extraer la tarjeta Micro SD, tiene dimensiones de 7,8*13,5*6,2cm, teniendo el diseño se envía a una empresa encargada de imprimir en material ABS, para garantizar la protección de todos los componentes internos y externos.

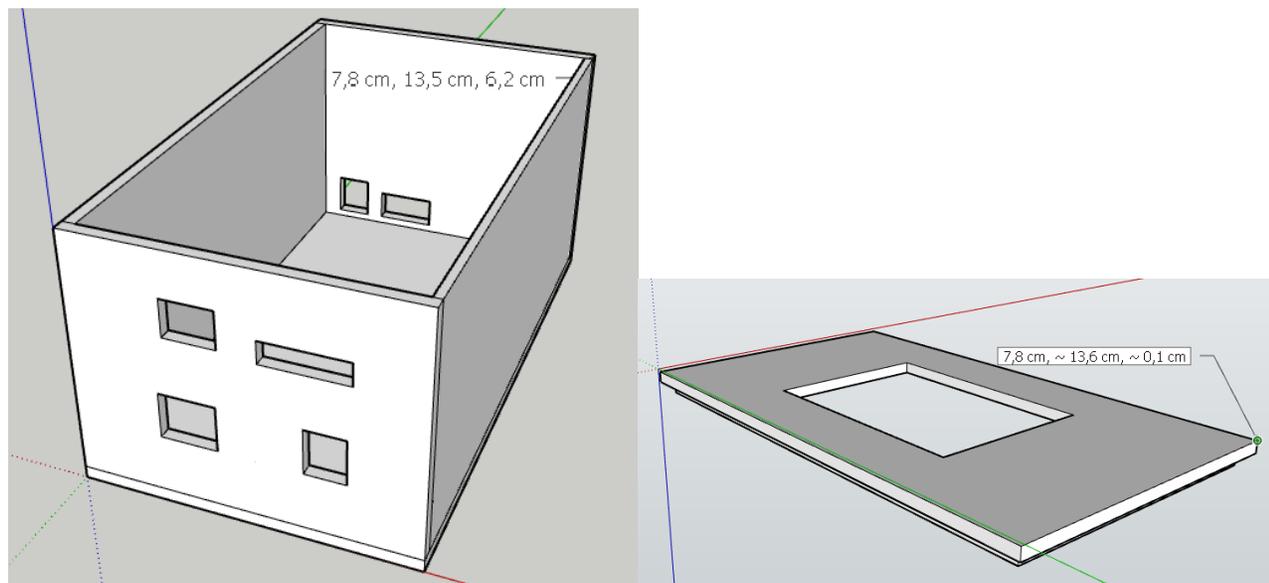


Figura 9. Diseño caja vista 3D. Fuente: Elaboración propia

4. Pruebas

4.1. Soporte de energía

La alimentación del dispositivo se realiza por alguna de las entradas externas, ya sea la entrada USB tipo B con un voltaje de 5v o la entrada Jack frontal que recibe un voltaje entre 6-20v, en caso de no tener alguna de estas fuentes de alimentación el dispositivo cuenta con una batería recargable que proporciona un voltaje de 7.8V, deja de alimentar el circuito cuando está por debajo de los 6V ya que el Arduino Mega requiere por esta entrada un voltaje entre 6-20v, aunque lo recomendable es entre 7-12v. Se le realizó a la batería una prueba constante desde la carga hasta la descarga de la misma y se midió una tasa de aproximadamente 0.26V consumidos por hora, llegando así a un total de 7 horas funcionales; la carga de la batería se realiza por el conector Jack de la parte posterior con un voltaje de entrada de 9v.

4.2. IMU y Acelerómetro

Antes de utilizar los acelerómetros se realiza una calibración, durante esta se mantiene el sensor sin mover en la posición de trabajo habitual, el programa empieza por leer los offsets, corrige los errores de las medidas, para ello modifica constantemente el offsets, usando un filtro y cada 100 lecturas comprueba los valores si se acercan a los que deseamos leer, aumentando o disminuyendo los offset. Esto hará que las lecturas filtradas se acerquen a:
aceleración: $a_x=0$, $a_y=0$, $a_z=+16384$, Velocidad angular: $g_x=0$, $g_y=0$, $g_z=0$.

promedio:	-9	-19	16364	-5	-2	-6
promedio:	9	2	16389	-1	5	2
promedio:	-1	-16	16369	1	2	3
promedio:	12	-5	16390	0	-8	-3
promedio:	-2	20	16384	-1	0	-7
promedio:	7	-4	16405	9	6	4
promedio:	-8	3	16381	6	1	7
promedio:	8	-7	16405	-1	-1	-4
promedio:	-15	1	16374	5	6	7

Figura 10. Calibración IMU GY-86. Fuente: Elaboración propia

Después de la calibración se toman los valores arrojados de aceleración y giro realizando una simulación de movimiento, en las siguientes tablas se muestran los valores tomados y su clasificación de acuerdo a la escala de Mercalli Modificada, por muestra se toman 10 datos comparando las aceleraciones del IMU GY-86 y el acelerómetro MMA7361, manejando el eje x y el eje y en tablas diferentes, puesto que los valores no se pueden comparar ya que la aceleración dependerá de la dirección del movimiento.

En primer momento, se ubica el dispositivo en un lugar estable y en el cual se trabajaron todas las pruebas, se toman los datos después de un tiempo de estar en ese estado y se clasifican de acuerdo al valor promediado de los dos sensores, como se muestra en la Tabla1.

Estado trabajo habitual en eje X				Estado trabajo habitual Y			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli	Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
-0,06	0,02	0,04	No apreciable	1,09	0,00	0,55	No apreciable
-0,13	-0,03	0,08	No apreciable	1,25	-0,02	0,64	No apreciable
-0,06	0,05	0,06	No apreciable	1,25	-0,03	0,64	No apreciable
-0,10	0,00	0,05	No apreciable	1,21	0,03	0,62	No apreciable
-0,12	0,05	0,09	No apreciable	0,94	0,02	0,48	No apreciable
-0,02	0,03	0,03	No apreciable	0,94	0,00	0,47	No apreciable
-0,02	-0,01	0,02	No apreciable	0,98	0,08	0,53	No apreciable
-0,02	0,07	0,05	No apreciable	1,05	-0,01	0,53	No apreciable
0,02	0,00	0,01	No apreciable	0,94	0,06	0,50	No apreciable
-0,02	0,00	0,01	No apreciable	0,90	-0,05	0,48	No apreciable

Tabla 1. Estado de trabajo habitual en eje X y Y Fuente: Elaboración Propia

Teniendo el dispositivo en funcionamiento se empieza a simular un movimiento suave en el que nuevamente se toman los valores y se clasifican, como se muestra en la Tabla 2.

Movimiento suave en eje X				Movimiento suave en eje Y			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli	Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
-1,86	-0,42	1,14	Muy leve	0,36	0,32	0,34	No apreciable
-0,36	-0,29	0,33	No apreciable	1,63	0,24	0,94	Muy leve
-1,71	-0,47	1,09	Muy leve	1,40	0,24	0,82	Muy leve
-1,82	-0,56	1,19	Muy leve	1,51	1,00	1,26	Muy leve
-0,10	0,89	0,50	No apreciable	1,09	1,01	1,05	Muy leve
-0,33	1,88	1,11	Muy leve	1,25	2,39	1,82	Leve
-0,25	-2,04	1,15	Muy leve	1,74	0,19	0,97	Muy leve
-0,56	-3,48	2,02	Leve	0,90	0,71	0,81	Muy leve
1,09	1,71	1,40	Muy leve	2,21	1,71	1,96	Leve
1,02	1,02	1,02	Muy leve	1,40	0,28	0,84	Muy leve

Tabla 2. Movimiento suave en eje X y Y Fuente: Elaboración Propia

Sin detener el movimiento, se empieza a aumentar el ritmo de la simulación y se van tomando los 10 datos para repetir el proceso anterior, como se muestra en las siguientes tres tablas.

Movimiento moderado en eje X			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
2,82	1,68	2,25	Leve
4,51	1,82	3,17	Leve
-2,97	-3,38	3,18	Leve
3,05	2,26	2,66	Leve
-1,25	3,31	2,28	Leve
-1,44	-3,15	2,30	Leve
-2,01	-4,20	3,11	Leve
-1,48	-1,78	1,63	Muy leve
-3,89	-1,98	2,94	Leve
-2,63	-3,09	2,86	Leve

Movimiento moderado en eje Y			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
1,67	1,68	1,68	Muy leve
2,01	-0,12	1,07	Muy leve
6,54	-0,96	3,75	Leve
4,08	0,31	2,20	Leve
6,54	1,95	4,25	Leve
-0,56	3,34	1,95	Muy leve
4,62	3,36	3,99	Leve
2,40	1,67	2,04	Leve
-0,48	-3,34	1,91	Leve
1,17	1,08	1,13	Muy leve

Tabla 3. Movimiento moderado en eje X y Y Fuente: Elaboración Propia

Movimiento fuerte en eje X			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
-14,06	9,45	11,76	Fuerte
-5,27	-11,06	8,17	Moderado
-1,36	5,87	3,62	Leve
-12,87	-0,4	6,64	Moderado
-2,55	-1,44	2,00	Leve
-6,69	-3,86	5,28	Moderado
-2,47	-2,89	2,68	Leve
-3,55	14,85	9,20	Moderado
-9,61	-9,93	9,77	Moderado
5,12	4,59	4,86	Leve

Movimiento fuerte en eje Y			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
-13,56	-3,69	8,63	Moderado
13,18	1,27	7,23	Moderado
8,3	1,71	5,01	Moderado
14,75	10,18	12,47	Fuerte
-1,29	-8,85	5,07	Moderado
-7,54	-3,18	5,36	Moderado
-15,25	-0,4	7,83	Moderado
4,51	11,06	7,79	Moderado
3,24	9,75	6,50	Moderado
-3,16	-11,89	7,53	Moderado

Tabla 4. Movimiento fuerte en eje X y Y Fuente: Elaboración Propia

Movimiento muy fuerte en eje X			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
10,61	14,61	12,61	Fuerte
-10,95	-10,99	10,97	Fuerte
-7,96	-11,75	9,86	Moderado
-9,26	4,45	6,86	Moderado
9,76	12,52	11,14	Fuerte
-9	-2,86	5,93	Moderado
-2,05	-11,37	6,71	Moderado
10,94	9,94	10,44	Fuerte
-9,57	-9,4	9,49	Moderado
19,58	11,31	15,45	Fuerte

Movimiento muy fuerte en eje Y			
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Escala Mercalli
12,2	11,39	11,80	Fuerte
-4,93	-6,14	5,54	Moderado
7,34	13,26	10,30	Fuerte
-1,98	-3,49	2,74	Leve
10,74	8,78	9,76	Moderado
5,08	15,82	10,45	Fuerte
-8,65	-7,71	8,18	Moderado
-1,09	5,78	3,44	Leve
12,95	4,23	8,59	Moderado
5,47	11,19	8,33	Moderado

Tabla 5. Movimiento muy fuerte en eje X y Y Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se obtiene el promedio de las aceleraciones tomadas durante el movimiento generado para poderlas graficar y verificar el escalamiento proporcional al aumento de movimiento simulado.

Aceleración X	Nivel	Escala
0,042	1	No apreciable
1,093	2	Muy leve
2,635	3	Leve
6,395	4	Moderado
9,944	4	Moderado

Tabla 6. Movimiento en eje X Fuente: Elaboración Propia

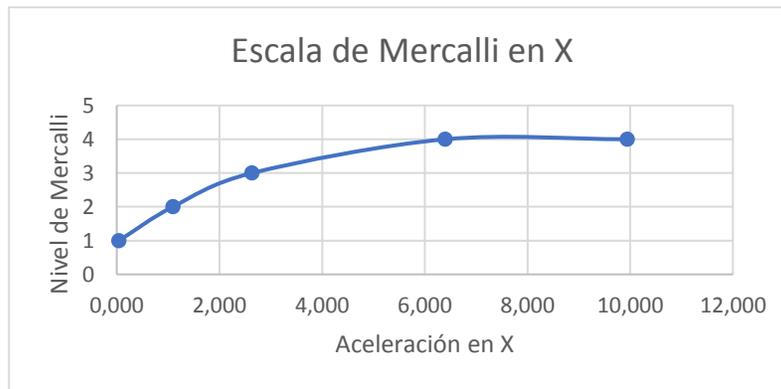


Figura 11. Grafica Tabla 6 Fuente: Elaboración Propia

Aceleración Y	Nivel	Escala
0,543	1	No Apreciable
1,079	2	Muy leve
2,394	3	Leve
7,338	4	Moderado
7,911	4	Moderado

Tabla 7. Movimiento en eje Y Fuente: Elaboración Propia

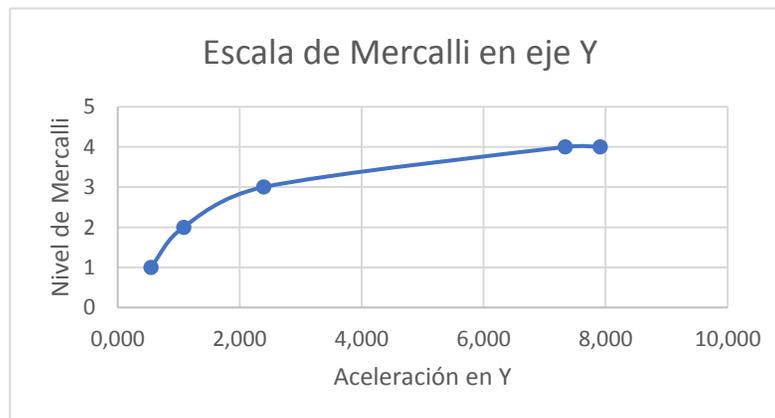


Figura 12. Grafica Tabla 7 Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente, se repiten las pruebas, pero esta vez comparando el promedio de los dos sensores del dispositivo con el acelerómetro LSM6DS3 que está incorporado en un teléfono móvil, obteniendo los valores desde una aplicación (Sensor Kinetics). Se ubica el celular encima y unido al dispositivo buscando que los ejes tengan la misma dirección de aceleración.

Como se hizo en las anteriores pruebas, primero se deja el sensor en estado de reposo y se toman 10 datos por muestra, buscando de igual forma que se tomen los datos de ambos dispositivos al mismo tiempo.

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje X reposo				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
-0,36	0,02	0,19	0,01	No Apreciable
-0,25	-0,02	0,14	0,017	No Apreciable
-0,44	-0,03	0,24	0,173	No Apreciable
-0,25	-0,08	0,17	0,0112	No Apreciable
-0,33	-0,04	0,19	-0,0196	No Apreciable
-0,33	0,01	0,17	0,054	No Apreciable
-0,36	-0,02	0,19	0,0211	No Apreciable
-0,33	0,02	0,18	0,0148	No Apreciable
-0,29	-0,02	0,16	0,0217	No Apreciable
-0,33	0,09	0,21	0,0139	No Apreciable

Tabla 8. Aceleración en X estado de reposo dispositivo y celular Fuente: Elaboración Propia

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje Y reposo				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
0,75	-0,02	0,39	0,0685	No Apreciable
0,82	0	0,41	0,0824	No Apreciable
0,9	-0,03	0,47	0,0743	No Apreciable
0,75	-0,01	0,38	0,0628	No Apreciable
0,75	-0,01	0,38	0,0738	No Apreciable
0,82	-0,04	0,43	0,0551	No Apreciable
0,79	-0,01	0,40	0,0852	No Apreciable
0,86	-0,02	0,44	0,0797	No Apreciable
0,86	-0,01	0,44	0,0642	No Apreciable
0,079	-0,03	0,05	0,0839	No Apreciable

Tabla 9. Aceleración en Y estado de reposo dispositivo y celular Fuente: Elaboración Propia

Teniendo los dispositivos en funcionamiento se empieza a simular un movimiento suave en el que nuevamente se toman los valores y se clasifican de acuerdo a la escala escogida, como se muestra en la Tabla 10 en el eje X y Tabla 11 en el eje Y

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje X suave				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
-1,36	-1,25	1,305	1,08	Muy Leve
-1,36	-1,32	1,34	0,92	Muy Leve
-1,21	-1,18	1,195	1,32	Muy Leve
-1,25	-1,19	1,22	0,97	Muy Leve
-1,48	-1,06	1,27	1,43	Muy Leve
-1,09	-0,79	0,94	0,83	No Apreciable
-1,13	-1,76	1,445	0,7	Muy Leve
-1,17	-0,7	0,935	1,5	Muy Leve
-1,29	-1,16	1,225	1,12	Muy Leve
-1,29	-1,31	1,3	1,39	Muy Leve

Tabla 10. Aceleración en X movimiento suave dispositivo y celular Fuente: Elaboración Propia

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje Y suave				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
1,67	0,88	1,28	1,03	Muy Leve
1,78	0,95	1,37	0,91	Muy Leve
1,74	0,88	1,31	1,09	Muy Leve
1,63	0,9	1,27	1,22	Muy Leve
1,86	0,93	1,40	1,4	Muy Leve
1,82	0,99	1,41	1,12	Muy Leve
1,63	0,81	1,22	0,99	Muy Leve
1,67	0,94	1,31	1,22	Muy Leve
1,71	0,87	1,29	1,17	Muy Leve
1,63	0,88	1,26	0,9	Muy Leve

Tabla 11. Aceleración en Y movimiento suave dispositivo y celular Fuente: Elaboración Propia

Sin detener el movimiento, se empieza a aumentar el ritmo de la simulación y se van tomando los 10 datos repitiendo el proceso anterior, como se muestra en las siguientes tablas.

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje X moderado				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
3,32	3,78	3,55	4,03	Leve
2,32	1,16	1,74	2,82	Muy Leve
3,36	1,17	2,27	2,38	Leve

2,13	1,6	1,87	-2,96	Leve
2,4	3,56	2,98	1,78	Leve
1,17	0,71	0,94	1,23	Muy Leve
2,18	1,86	2,02	4,37	Leve
2,17	2,24	2,21	2,38	Leve
-3,05	-2,85	2,95	-3,32	Leve
1,82	1,91	1,87	2,42	Leve

Tabla 12. Aceleración en X Dispositivo y Celular Estado moderado Fuente: Elaboración Propia

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje Y moderado				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
1,05	0,55	0,80	1,57	Muy Leve
1,86	1,93	1,90	2,2	Leve
1,59	1,17	1,38	1,45	Muy Leve
1,25	-0,15	0,70	1,75	Muy Leve
1,67	1,49	1,58	1,43	Muy Leve
3,43	2,17	2,80	2,87	Leve
2,36	0,89	1,63	2,65	Muy Leve
1,94	2,06	2,00	2,73	Leve
1,94	-0,09	1,02	1,12	Muy Leve
2,21	2,23	2,22	2,48	Leve

Tabla 13. Aceleración en Y Dispositivo y Celular Estado moderado Fuente: Elaboración Propia

Se toman los datos hasta una simulación de movimiento fuerte (Tabla 14 y 15), llegando a un nivel V Moderado según la Escala de Mercalli Modificada, observando que los valores máximos de aceleración que se pueden registrar con el celular son cercanos a 9,81 y el dispositivo tiene un rango máximo de medida de aproximado de 160G para llegar a un nivel VIII en la Escala de Mercalli Modificada.

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje X fuerte				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
5,04	5,97	5,51	3,68	Moderado
3,24	4,07	3,66	3,58	Leve
4,89	6,05	5,47	5,08	Moderado
6,67	7,37	7,02	7,02	Moderado
3,93	4,71	4,32	3,89	Leve
5,04	4,58	4,81	4,68	Leve
6,46	6,53	6,50	6,35	Moderado
6,12	5,3	5,71	6,23	Moderado
8,11	7,18	7,65	6,23	Moderado
4,24	3,77	4,01	4,37	Leve

Tabla 14. Aceleración en X Dispositivo y Celular Estado Fuerte Fuente: Elaboración Propia

Acel Dispositivo VS Acel Celular eje Y fuerte				
Acc MMA(gal)	Acc IMU(gal)	Promedio	Acc Celular	Escala Mercalli
4,97	4,33	4,65	3,68	Leve
-5,39	-4,2	4,80	-4,92	Moderado
4,7	4,16	4,43	3,91	Leve
5,24	4,64	4,94	4,2	Leve
5,5	4,48	4,99	5,54	Moderado
5,85	6,89	6,37	5,54	Leve
5,47	6,43	5,95	5,51	Moderado
5,93	7,02	6,48	5,48	Leve
5,01	6	5,51	6,6	Muy Leve
3,74	4,88	4,31	4,5	Leve

Tabla 15. Aceleración en Y Dispositivo y Celular Estado Fuerte Fuente: Elaboración Propia

4.3. GPS

Se realizan varias capturas de datos del módulo GPS NEO 7M en diferentes puntos de ubicación, se leen y se verifican las coordenadas en el sistema de geo localización de Google (Google Maps).

Una de las pruebas fue tomada en la biblioteca de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Tecnológica, Bogotá D.C. con las coordenadas 4.579043, -74.158615 verificadas en Google Maps.

4.4. Servidor Local

En primer momento se realiza la conexión del dispositivo a la red, se obtiene la dirección IP en la opción de la pantalla (DIRECCION IP), se toma y se ingresa en el navegador para poder visualizar los datos en el servidor local, se obtiene un paquete de datos enviados desde el Arduino y se actualizan con el refresco de la página, el servidor estará funcionando de manera constante siempre y cuando se mantenga la conexión. Además, es importante

tener en cuenta que el rango de conexión variará dependiendo del dispositivo que genera la red WiFi (modem, celular, etc.)

4.5. Tarjeta Micro SD

Para verificar el correcto funcionamiento de este módulo, se extrae en diferentes ocasiones y se lee el documento en el computador, comparando los datos guardados, con los del servidor; además se verifica el almacenamiento de los datos de forma continua hasta completar la capacidad de la memoria micro SD que en este caso es de 2Gb.

5. Resultados

Teniendo en cuenta las pruebas que se han realizado a cada uno de los módulos de forma individual como de forma conjunta para evaluar el funcionamiento del dispositivo, en primer momento se observa el envío de datos de manera constante, así mismo, para el funcionamiento del GPS fue necesario no tener tiempos de espera para que funcionara de manera adecuada y los demás sensores no generan inconvenientes; aquellos sensores usados para medir la aceleración y giro del dispositivo varían con la generación de movimiento de acuerdo a cada uno de sus ejes, en el caso de los acelerómetros no se tiene en cuenta el eje z para escalar los datos, puesto que en este se aplica el valor de la gravedad que es de $9,81\text{m/s}^2$, siempre que se cambia de lugar se calibra el IMU GY-86, para mejorar los datos que se toman en las mediciones.

Al realizar las pruebas de los acelerómetros y escalar los datos, se toman medidas desde un nivel I (No apreciable) en la escala de Mercalli Modificada, estando en un estado de reposo o estado habitual de trabajo hasta un nivel VI (Fuerte), ya que, los movimientos fueron simulados y desde ese nivel en adelante los movimientos son más bruscos y no se tenía la

forma de emularlos. Por otra parte, al comparar las aceleraciones de los dos sensores, se observa que los valores tomados en el eje X son más cercanos, en cambio hay mayor diferencia entre los valores tomados en el eje Y, pero que se van corrigiendo a medida que el valor aumenta.

Tomando el dispositivo móvil como punto de referencia en la aceleración, y observando los resultados de comparación entre el dispositivo y el celular mientras se realiza una simulación de movimientos, se observa que los valores en estado de reposo, siempre están más altos en el dispositivo, específicamente en el sensor MMA 7361, generando un error del 418%, pero sin salirse de la Escala 1 o No apreciable, a medida que el movimiento simulado aumenta, estos valores se van corrigiendo, hasta llegar a una diferencia máxima de 0.53 Gal con un error del 6%.

Por otra parte, se verifica el correcto funcionamiento del GPS, teniendo en cuenta la validación de los datos en Google Maps, aunque en la hora recibida si se observa un desfase de -5 horas por la zona horaria en la que se está ubicado (Bogotá D.C. - Colombia). Teniendo todo el sistema integrado, se valida el funcionamiento, con la comunicación al servidor recibiendo una sola captura de datos por actualización de la página y con respecto al almacenamiento de la tarjeta SD se obtienen los datos guardados de forma continua en un archivo de texto.

Se puede observar en la figura 13 el dispositivo finalizado, cumpliendo con las características antes mencionadas.



Figura 13. Dispositivo final Fuente: Elaboración Propia

6. Conclusiones

- El uso de un punto de comparación de datos de aceleración como lo fue en este caso el celular, permite verificar que la toma de las muestras sea más cercana a las reales, aun siendo una simulación. De esta forma, el dispositivo cumple con el desempeño esperado inicialmente, teniendo de igual forma las pruebas de funcionamiento continuo, comunicación y almacenamiento para poder ser usado en la detección de sismos y generación de alertas, proyectando el dispositivo a la creación de una red para la detección de actividad sísmica.
- Realizando la revisión del estado del arte y tomando las ideas importantes para la contribución del dispositivo, se denota que, la aceleración es el valor que no puede faltar en ningún dispositivo de sensado de actividad sísmica, ya que la aceleración es un indicador del daño que se puede causar en un sismo, es por esto la importancia del uso de dos acelerómetros en el dispositivo que se puedan comparar entre ellos. El uso de la escala de Mercalli Modificada (MMI) permite que la toma de muestras se pueda relacionar con niveles sísmicos, puesto que, la

aceleración es el valor comparable con el que se cuenta, y para poder dar una magnitud en la escala de Richter se debe contar con una red de dispositivos necesitando la distancia con respecto al epicentro.

- Teniendo en cuenta que el servidor es un medio de visualización de los datos, mas no de registro, el almacenamiento de los datos mediante una tarjeta SD permite un respaldo de la información en caso de perder conexión al servidor local para su posterior análisis. De la misma manera, la pantalla incluida en el dispositivo sirve como medio de verificación de los datos y el funcionamiento continuo del dispositivo, además de entregar la dirección IP para realizar una correcta conexión al servidor.
- En cualquier dispositivo electrónico es importante contar con fuentes alternativas de alimentación para evitar pérdidas de información, de producción, entre otras. La batería incorporada en el dispositivo se usa como medio alternativo de alimentación en caso de no contar con las fuentes principales, se caracteriza por entregar un voltaje de 7,8V con una corriente de 4800mA en un uso continuo de 7 horas aproximadamente, a una descarga de 0,26V por hora.

Trabajo a futuro

- Corrección del soporte de energía adaptando un sistema de alimentación de emergencia automático, en donde se active al instante de no tener una alimentación principal.
- Implementación de un servidor web, donde la actualización de los datos sea constante para un mejor análisis.

- Evaluación del dispositivo con respecto a equipos certificados para medir actividad sísmica.

7. Referencias

- [1] IDIGER, "Caracterización General del Escenario de Riesgo Sísmico," *IDIGER, Inst. Dist. Gest. Riesgos y Cambio Clim.*, 2019.
- [2] N. E. C. Corporation, "Sistema Alerta Temprana en Japón," p. 18, 2018.
- [3] F. Finazzi, "EARTHQUAKE NETWORK AUTHOR," *EARTHQUAKE NETWORK Crowdsourced smartphone-based Earthquake Early Warning system*. [Online]. Available: <http://wp.earthquakenetwork.it/es/contact/>.
- [4] R. ÁLVAREZ, "Nuestro smartphone podría servir como herramienta para alertar de posibles terremotos," *XATAKA COLOMBIA*, 2016. [Online]. Available: <https://www.xataka.com.co/celulares/nuestro-smartphone-podria-servir-como-herramienta-para-alertar-de-posibles-terremotos>.
- [5] F. Finazzi, "The Earthquake Network Project: Toward a Crowdsourced Smartphone-Based Earthquake Early Warning System," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016.
- [6] F. Finazzi, "EL PROYECTO EARTHQUAKE NETWORK," *EARTHQUAKE NETWORK Crowdsourced smartphone-based Earthquake Early Warning system*. [Online]. Available: <http://wp.earthquakenetwork.it/es/>.
- [7] H. Miura, Y. Shimazaki, N. Matsuda, and F. Uchio, "Base station Earthquake observation program Seismic information," *Earthquake*, pp. 673–679, 2008.
- [8] A. M. Zambrano, I. Perez, C. Palau, and M. Esteve, "Sensor Web Enablement Applied to an Earthquake Early Warning System," vol. 8223, pp. 51–62, 2013.
- [9] D. Hilbring, T. Titzschkau, A. Buchmann, G. Bonn, F. Wenzel, and E. Hohnecker, *Earthquake early warning for transport lines*, vol. 70, no. 3. 2014.
- [10] A. Z. Vizueté, I. P. Llopis, C. P. Salvador, and M. E. Domingo, "Sistema Distribuido de Detección de Sismos Usando una Red de Sensores Inalámbrica para Alerta Temprana.," *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 12, no. 3, pp. 260–269, 2015.
- [11] M. Portnoi, S. Schlachter, and M. Taufer, "Study of the network impact on earthquake early warning in the Quake-Catcher Network project," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 29, pp. 453–464, 2014.
- [12] J. Fischer *et al.*, "A wireless mesh sensing network for early warning," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 35, no. 2, pp. 538–547, 2012.

- [13] M. H. Rafiei and H. Adeli, "NEEWS: A novel earthquake early warning model using neural dynamic classification and neural dynamic optimization," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 100, no. May, pp. 417–427, 2017.
- [14] B. Andò, S. Baglio, and A. Pistorio, "A low cost multi-sensor strategy for early warning in structural monitoring exploiting a wavelet multiresolution paradigm," *Procedia Eng.*, vol. 87, pp. 1282–1285, 2014.
- [15] C. Satriano, L. Elia, C. Martino, M. Lancieri, A. Zollo, and G. Iannaccone, "PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: Concepts, capabilities and future perspectives," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 137–153, 2011.
- [16] J. G. Henry; and G. W. Heinke, *INGENIERIA AMBIENTAL*, 2da ed. Mexico D.F., 1999.
- [17] C. F. Richter, "Modified Mercalli Scale," *Elem. Seismol.*
- [18] L. Danciu, "Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity and Engineering Ground-Motion Parameters in Greece," vol. 98, no. 4, pp. 1863–1875, 2008.
- [19] L. D. I. Sísmica *et al.*, "RELATIONSHIP BETWEEN PEAK GROUND ACCELERATION AND MODIFIED MERCALLI INTENSITY IN COSTA RICA Lepolt Linkimer Present address : Department of Geosciences , The University of Arizona ,," pp. 81–94, 2008.
- [20] EcoExploratorio, "MAGNITUD, INTENSIDAD Y ACELERACIÓN." [Online]. Available: <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/magnitud-intensidad-y-aceleracion/#prettyPhoto>.
- [21] I. C. D. Interface, "3-Axis Digital Compass IC HMC5883L," p. 20, 2010.
- [22] GEEKER, "Arduino GY-521." [Online]. Available: https://www.geeker.co.nz/images/companies/1/products/Arduino_GY-521_bb_1.png.
- [23] SAE-MAN-005, "1. [MPU6050 - Acelerómetro]," pp. 1–5.
- [24] D. Sheet, "NEO-7."
- [25] C. Diagram, P. Configuration, and E. Ratings, "MMA7361 3-Axis Accelerometer Module Table of Contents : Circuit Diagram :," 2013.
- [26] T. Electronic, "TFT 2.4 Pantalla LCD Panel Táctil ILI9341 240X320." [Online]. Available: <https://www.teslaelectronic.com.pe/producto/tft-2-4-pantalla-lcd-panel-tactil-ili9341-240x320/>.
- [27] M. Series, "WeMos," no. July, 2017.