

# Diseño e Implementación de Dispositivo Prototipo IoT para la Detección de Ondas Sísmicas P para un Sistema de Alerta Temprana

Rafael Fernando Lindarte Salcedo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico.

Director

José Alejandro Amaya Palacio

Doctor en Ingeniería Eléctrica: Microelectrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

Primeramente, a Rosita y Rodolfo, mis padres, quienes han sido los pilares de mi vida y que, a través de su acompañamiento han formado la persona que soy hoy en día. A mis hermanos Sandra y Daniel, mi abuela, quienes han sido la motivación para superar cada objetivo, y al igual que mis padres, estuvieron presentes en cada día de mi formación.

A la señora Omaira, Carolina y Vicky, quienes son parte de mi familia y han velado por mi bienestar.

A mis amigos, Danilo, Helmut, Duván, Juan Diego y Sebastián, que fueron una constante guía en todo el pregrado, sin ellos esta historia fuese diferente; por sus grandes enseñanzas, buenos deseos y grandes acompañamientos.

A Meliza, quien desde el inicio creyó en mi, ayudo a desarrollar mi potencial y me enseñó a ver la vida de la mejor forma transformando al joven en un adulto profesional.

A todos ustedes dedico esto.

### **Agradecimientos**

Mi profundo y más grande agradecimiento a los profesor Jose Alejandro Amaya Palacio quién me apoyo y me aconsejó durante todo el desarrollo de mi tesis; A mis compañeros de carrera, con su gran compañerismo y amistad logre culminar éste proceso académico de la mejor manera.

Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, mi alma máter, que junto a sus docentes de gran calidad ayudaron en mi proceso de formación académica.

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>12</b>
<b>1 Objetivos</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos	14
<b>2 Análisis y Discusión</b>	<b>15</b>
2.1 Origen del Problema	15
2.2 Ondas Sísmicas de Interés	16
2.2.1 Relación Entre Ondas P y S y sus Efectos	16
2.3 Sistema de Alerta Temprana	18
2.3.1 Según el Tipo de Fenómeno que Monitorea	18
2.3.2 Según los Mecanismos de Funcionamiento	19
2.4 SAT Sismológico	20
2.5 Nido Sísmico de los Santos, Bucaramanga	21
<b>3 Métodos y Materiales</b>	<b>21</b>
3.1 Propuesta General	23
3.2 Propuesta Analógica	25
3.2.1 Sensado de Señal Diferencial	26
3.2.2 Etapa de Filtrado	27
3.2.3 Circuito de Protección	28
3.3 Propuesta Digital	29
3.3.1 Digitalización de la señal	32
3.3.2 Algoritmo de Detección de Eventos Sismológicos	33

3.3.3	Sincronización Temporal	33
3.3.4	Conectividad Wi-Fi	34
3.3.5	Envío de Alerta	34
3.3.6	Acceso Remoto	35
3.4	Base de Datos: Origen de los Datos	35
3.5	Algoritmo de Detección Sísmica	38
<b>4</b>	<b>Análisis y Resultados</b>	<b>40</b>
4.1	Simulaciones de Etapa Analógica	40
4.1.1	Sensado de Señal Diferencial	41
4.1.2	Etapa de Filtrado	41
4.1.2.1	Filtro Notch	42
4.1.2.2	Filtro Pasa-Bajas	43
4.1.3	Circuito de Protección	44
4.2	Pruebas de Adquisición de Datos	44
4.3	Validación del Algoritmo de Detección	48
4.4	PCB y Ensamble Final	52
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>55</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>57</b>
	<b>Apéndice A</b>	<b>60</b>

**Lista de Figuras**

Figura 1	Zonas de amenazas sísmicas en el territorio colombiano	17
Figura 2	Objetivos de un SAT	18
Figura 3	Modelo de infraestructura de un SAT	21
Figura 4	Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia)	22
Figura 5	Diagrama general del prototipo de estación de detección sismológica	24
Figura 6	Topología del circuito analógico de un canal	25
Figura 7	Etapa 1: circuito de sensado diferencial	26
Figura 8	Etapa 2: circuito de filtrado	27
Figura 9	Etapa 3: circuito de protección	28
Figura 10	Diagrama funcional ESP32	30
Figura 11	Componentes de software y características	31
Figura 12	Funcionalidades implementadas	32
Figura 13	Esquema para obtención de los datos	36
Figura 14	Código en python para obtener el set de datos	36
Figura 15	Ejemplo de evento sismológico	37
Figura 16	Ejemplo de criterio de elección del umbral	38
Figura 17	Esquemático: circuito diferencial	40
Figura 18	Simulación circuito amplificador diferencial	41
Figura 19	Esquemático: circuito notch	42
Figura 20	Esquemático: filtro pasa-bajas	42
Figura 21	Respuesta en frecuencia del filtro notch	43
Figura 22	Respuesta en frecuencia del circuito pasa-bajas	43
Figura 23	Esquemático: circuito de protección	44
Figura 24	Simulación circuito de protección	45

Figura 25	Montaje del prototipo de detección	45
Figura 26	Simulación efecto en cascada de los filtros	47
Figura 27	Frecuencia de corte filtro pasa-bajas	47
Figura 28	Ejemplos de funcionamiento del algoritmo	48
Figura 29	Mapa de dispersión STA/LTA, antes de la llegada del arribo (Ruido) y después (Onda P)	50
Figura 30	Diseño y ensamblaje	53
Figura 31	Señales captadas a la salida de la etapa analógica	53

**Lista de Tablas**

Tabla 1	Medidas del circuito de sensado	46
Tabla 2	Comportamiento del filtro notch, para una entrada de 150mV	46
Tabla 3	Resultados del algoritmo para adecuación de umbrales	51
Tabla 4	Resultados de detección	52

## **Lista de Apéndices**

**Apéndice A.** Scripts y archivos del proyecto

## Resumen

**Título:** Diseño e implementación de dispositivo prototipo IoT para la detección de ondas sísmicas p para un sistema de alerta temprana. \*

**Autor:** Rafael Fernando Lindarte Salcedo. \*\*

**Palabras Claves:** ESP32, Sistema de Alerta Temprana (SAT), Sismología, Trazas Sísmicas.

**Descripción:** en Colombia existen densidades poblacionales que se encuentra en zonas de alta probabilidad de desastres naturales, con el objetivo de brindar una garantía de protección en el desarrollo territorial los sistemas de alerta temprana desempeñan un rol fundamental para salvaguardar sistemas productivos, infraestructura vital y otros bienes. Según el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, (2022), El territorio colombiano presenta diferentes niveles de amenaza sísmica (alta, intermedia y baja). Aproximadamente el 83% de la población nacional está ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. La orientación de este proyecto es brindar un primer acercamiento a este tipo de soluciones orientado a los fenómenos sismológicos, a través del desarrollo de un prototipo detector de eventos de alta intensidad de bajo costo implementado en un microcontrolador de 32 bits (ESP32) con conectividad IoT. El desarrollo de este trabajo de grado se hizo bajo la modalidad de pasantía, en colaboración con la empresa subsuelo3d S.A.S. En este documento se presentan los aspectos técnicos más relevantes del prototipo desarrollado. El desarrollo de este prototipo, dividida en dos secciones principales, la sección analógica y digital, la etapa analógica tiene como objetivo acondicionar las señales captadas para su procesamiento digital; La etapa digital del prototipo es la encargada de realizar la digitalización y procesamiento de las señales, y envío de alerta. El prototipo planteado tiene la capacidad de detectar el primer frente de onda (señal P de un evento sismológico).

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Jose Alejandro Amaya Palacio

### Abstract

**Title:** Design and implementation of an IoT prototype device for the detection of seismic p-waves for an early warning system <sup>\*</sup> .

**Author:** Rafael Fernando Lindarte Salcedo <sup>\*\*</sup> .

**Keywords:** ESP32, Early Warning System (EWS), Seismology, Seismic Traces.

**Description:** Across the Colombian territory, there are population densities located in areas with a high probability of natural disasters. In order to provide a guarantee of protection in territorial development, early warning systems play a fundamental role in safeguarding productive systems, vital infrastructure, and other assets. According to the Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, (2022), the Colombian territory presents different seismic hazard levels (high, intermediate, and low). Approximately 83 % of the national population is located in medium and high seismic hazard zones. This project intends to provide the first approach to this type of solution-oriented seismological phenomena, through the development of a prototype of high-intensity events of low cost implemented in a 32-bit microcontroller (ESP32) with IoT connectivity. This document presents the most relevant technical aspects of the developed prototype. The development of this prototype is structured in two main parts, the analog stage aims to condition the captured signals for digital processing, and the digital stage of the prototype is in charge of digitalizing and processing the signals and sending alerts. The proposed prototype can detect the first wavefront (P signal of a seismological event).

---

\* Undergrade Work

\*\* Faculty of Engineering Physicomechanics. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.  
Advisor: Jose Alejandro Amaya Palacio

## Introducción

La sismología comprende los fenómenos de propagación de ondas elásticas generadas de forma natural por medio del monitoreo de sismos de alta intensidad (e.g. terremotos). La perturbación que emiten estos eventos naturales es conocida como onda sísmica, la cual está formada por una superposición de ondas, algunas de estas ondas son: ondas primarias (P), secundarias (S), love (L) y rayleigh (R) y son captadas por un instrumento denominado sismógrafo. Debido a la naturaleza del fenómeno sísmico, las ondas P poseen una mayor velocidad, debido a la dirección de propagación del medio en comparación con las S (Stein y Wysession, 2009, pp. 3), por ende, este trabajo de grado se centró en la detección de ondas P, a través del diseño de un prototipo para una sistema de alerta temprana. Así, las ondas P y S son las de mayor interés debido a su relación con el impacto social que generan los eventos de gran magnitud.

Afortunadamente, los terremotos que representan un alto riesgo para la población son poco frecuentes debido a que la energía que liberan es acumulada lentamente a lo largo del tiempo (Ben-Menahem y Singh, 2012, pp. 11). El estudio de esta clase de sismos de alta intensidad ha sido clave para el desarrollo de sistemas de alerta temprana (SAT) (McBride y Others, 2020). Un SAT sísmico se encarga de percibir actividad sísmológica con potencial destructivo capaz de afectar zonas de gran densidad demográfica. Un SAT tiene limitaciones, pero algunas se pueden compensar ajustando los parámetros de diseño para garantizar un desempeño confiable. Una limitación común es el radio de cobertura entre la detección oportuna del sismo y el centro poblacional de interés, además, también se pueden presentar limitaciones técnicas, institucionales o comunitarios (Suárez y Espinosa, 2018).

Tras la revisión de sistemas de alerta temprana como los implementados en México y la costa oeste de los Estados Unidos (Suárez y Espinosa, 2018; McBride y Others, 2020), se identificaron características base en cuanto a aspectos técnicos de infraestructura. Seguidamente, se

desarrolló una propuesta adaptando las características a una menor escala y recursos limitados. Como resultado de esta investigación se presentará un prototipo de estación sismológica adaptado a las condiciones locales del nido sísmico presente en la mesa de los santos, Santander - Colombia. Para brindar cobertura al área metropolitana de Bucaramanga, Santander.

El desarrollo de este trabajo de grado se hizo bajo la modalidad de pasantía, en colaboración con la empresa subsuelo3d S.A.S. En este documento se presentan los aspectos técnicos más relevantes del prototipo desarrollado. El documento está estructurado de la siguiente forma, en el capítulo 2 se encuentra la base teórica que fundamenta los principios de funcionamiento, la justificación del desarrollo de este proyecto y requerimientos planteados para el desarrollo del prototipo. El capítulo 3 presenta los elementos que formaron parte del desarrollo del prototipo, desde los elementos electrónicos hasta las herramientas de software usadas para implementar cada una de las características requeridas, a su vez también presenta la exploración de la base de datos pública del servicio geológico colombiano y como se obtuvo el set de datos para validación. El capítulo 4 se presentan los resultados del funcionamiento del prototipo en las etapas analógicas y de procesamiento de la señal y finalmente en los anexos se encuentra la base de datos, los algoritmos implementados, los resultados del proceso de validación del algoritmo.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un dispositivo prototipo IoT para la detección de ondas sísmicas “P” para un sistema de alerta temprana.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Implementar una etapa analógica para la adquisición de un set de señales diferenciales de dos geófonos triaxiales.

Proponer un algoritmo para la discriminación de eventos sísmológicos validado a partir de un estudio realizado por subsuelo3d S.A.S.

Establecer los módulos de programación necesarios para asegurar la conectividad Wi-Fi y protocolos de comunicación.

Evaluar el prototipo por medio de pruebas de hardware y software.

## **2. Análisis y Discusión**

Este capítulo tiene como finalidad introducir algunos temas que conforman el escenario de la sismología, algunos tipos de ondas presentes en un evento sismológico y su vez la relevancia de algunas de estas para la implementación de un sistema de alerta temprana ó SAT.

### **2.1. Origen del Problema**

En Colombia existen densidades poblacionales que se encuentra en zonas de alta probabilidad de desastres naturales, con el objetivo de brindar una garantía de protección en el desarrollo territorial los sistemas de alerta temprana desempeñan un rol fundamental para salvaguardar sistemas productivos, infraestructura vital y otros bienes (UNGRD, 2021). Según el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, (2022), El territorio colombiano presenta diferentes niveles de amenaza sísmica (alta, intermedia y baja). Aproximadamente el 83 % de la población nacional está ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, la Figura 1 muestra las zonas con alto riesgo de amenaza sísmica en el territorio colombiano.

El objetivo de este proyecto es brindar un primer acercamiento a este tipo de soluciones orientado a los fenómenos sismológicos, donde se implementó un prototipo detector de eventos de alta intensidad (Earthquake Hazards, 2016). Como escenario de riesgo poblacional se resaltan dos ubicaciones importantes, la primera es la fuente de eventos sismológicos en el nido de los Santos (Municipio los Santos, Santander, Colombia); y la segunda es el área metropolitana de

Bucaramanga como centro poblacional ubicado en la zona de interés.

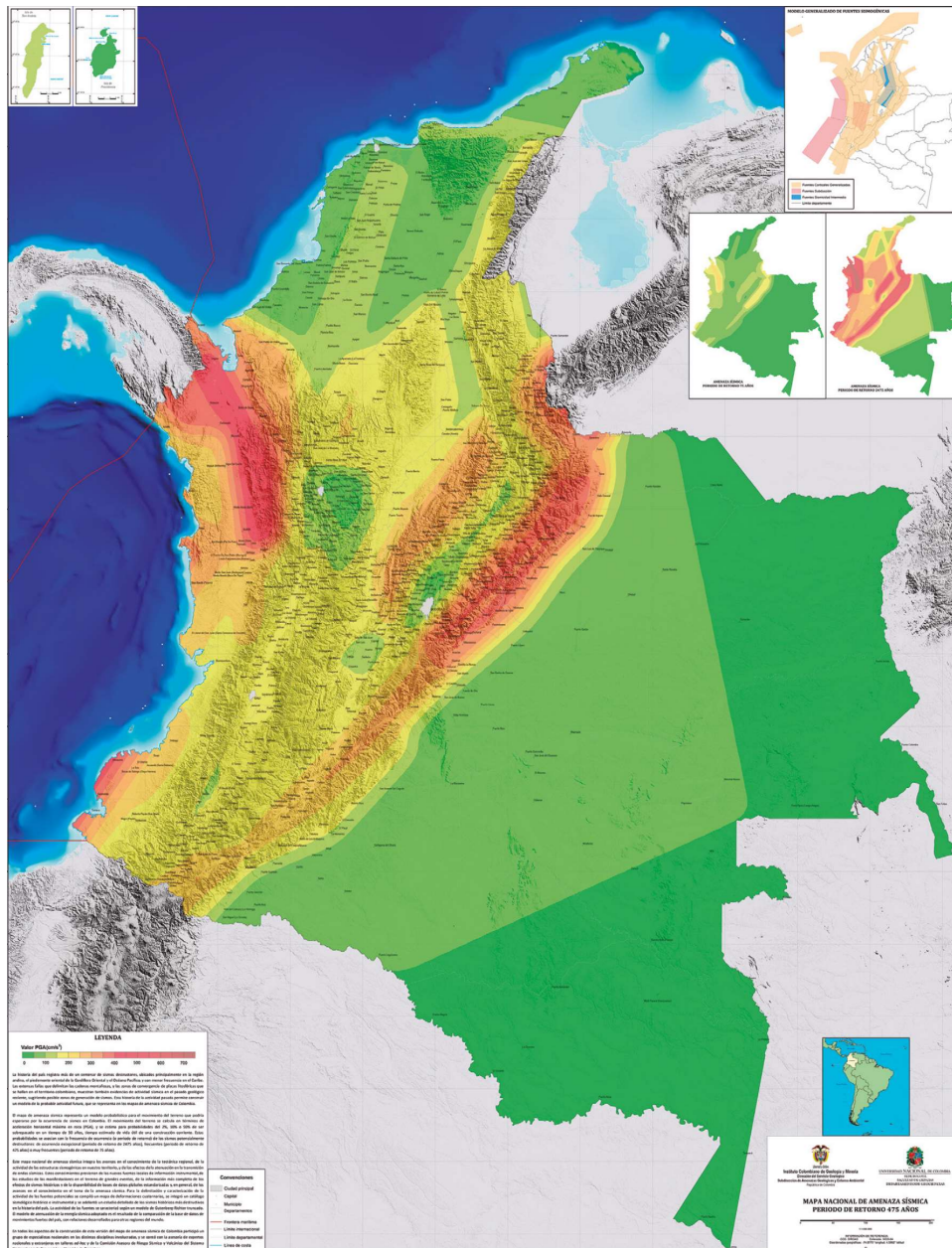
## **2.2. Ondas Sísmicas de Interés**

Los frentes de onda emitidos por los eventos sísmológicos de alta intensidad están formados por una superposición de ondas de cuerpo y de superficie, las ondas de cuerpo está conformadas por ondas primarias (P) y secundarias (S); entre las ondas de superficie se encuentran las ondas Love (L) y Rayleigh (R). Este trabajo tiene como eje central las denominadas ondas de cuerpo o *body waves* ya que estas ondas poseen velocidades de propagación mayores a las ondas superficiales, por este motivo son de utilidad para la detección del fenómeno y generación de una alerta temprana. Las ondas de compresión (P) mueven el material hacia delante y hacia atrás en el sentido de la propagación de la onda, mientras que las ondas Transversales (S) mueven el material de forma perpendicular a la dirección del movimiento de la onda (Stein y Wysession, 2009).

### ***2.2.1. Relación Entre Ondas P y S y sus Efectos***

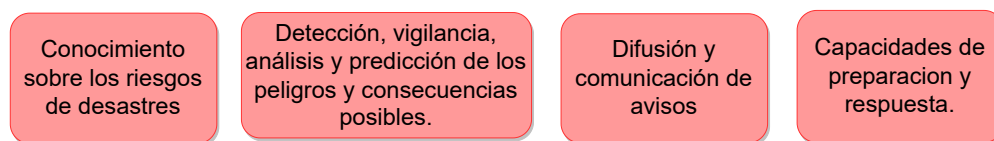
Debido a la naturaleza de las ondas de cuerpo se resaltan algunas distinciones, como característica principal la velocidad de propagación, donde, la velocidad de la onda P es mayor a la onda S (Stein y Wysession, 2009), la cual es el eje central para la detección oportuna de un evento y poder brindar una alerta efectiva ante una amenaza o riesgo sísmico.

Figura 1.  
Zonas de amenazas sísmicas en el territorio colombiano



Nota: Las zonas de colores cálidos (amarillo, naranja y rojo) representan una alta amenaza sísmica, siendo rojo la mayor intensidad. Tomado del modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia Servicio Geológico Colombiano © Fundación Global Earthquake Model ©, julio 2020

*Figura 2.*  
Objetivos de un SAT



### **2.3. Sistema de Alerta Temprana**

Un sistema de alerta temprana (SAT), reúne capacidades técnicas, institucionales, privadas y comunitarias necesarias para identificar y comunicar una eventualidad que cumpla el criterio de emergencia, la cual es suministrada por medio de canales públicos o privados a comunidades expuestas en el área afectada por la condición de amenaza con suficiente tiempo e información que permita responder y actuar apropiadamente frente a la ocurrencia del evento con el fin de reducir las pérdidas de vidas y los daños en las propiedades y al ambiente.

La implementación de un sistema de alerta temprana brinda a las instituciones y comunidades la capacidad de tomar acciones ante eventualidades cercanas o inminentes que ponen en peligro bienes, servicios y seres vivos; a partir de esto se pueden establecer los objetivos de un SAT, estos se condensan en el esquema mostrado en la Figura 2. De acuerdo a las características del SAT se pueden categorizar según el fenómeno que monitorea y el mecanismos de funcionamiento.

#### ***2.3.1. Según el Tipo de Fenómeno que Monitorea***

SAT hidrometeorológicos, tienen que ver con los diferentes elementos del clima, como la precipitación, temperaturas, humedad, entre otros. Geológicos, se enfocan en los fenómenos que

involucran la dinámica geológica del territorio, especialmente fenómenos con movimientos en masas, actividad volcánica y tsunamis. Ambientales, encargado de monitorizar y alertar la degradación del medio ambiente a través de procesos de contaminación del aire, agua o suelo, así como pérdida de biodiversidad. En salud, permiten detectar, comunicar y controlar rápidamente eventos agudos de salud pública de cualquier origen. Multiamenaza, acopla uno o varios de los tipos anteriores brindando ventajas como la eficiencia y coherencia de las alertas mediante mecanismos y capacidades coordinados, a su vez, presenta desventajas como el aumento de la complejidad y en caso de fallo, existe una alta probabilidad de que fallen los distintos tipos de alerta simultáneamente (UNGRD, 2021).

### ***2.3.2. Según los Mecanismos de Funcionamiento***

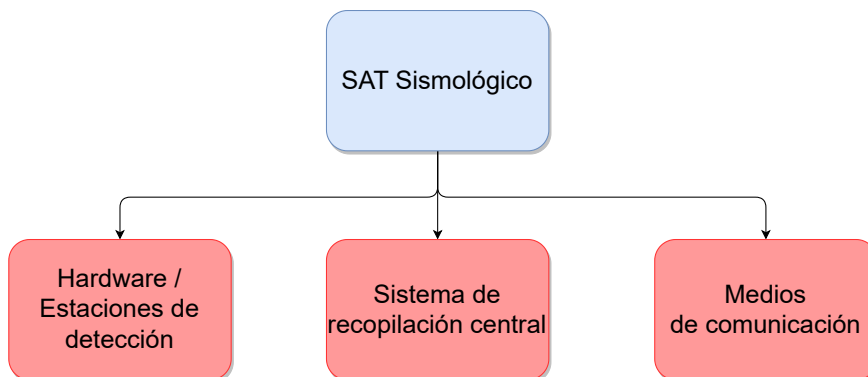
Se divide en tres tipos, SAT comunitario, institucional y mixto. Un SAT comunitario presenta características en su implementación por la comunidad donde será instalado, integrando las capacidades y conocimientos de la comunidad, es decir, está sujeto a la organización y autogestión de las mismas comunidades. Institucional, basados en el liderazgo y administración por entes públicas y privadas, constan con equipos que permiten la difusión de alertas con mayor alcance. Mixto, reúne elementos tanto comunitarios como institucionales, promoviendo una mayor eficiencia (UNGRD, 2021).

## 2.4. SAT Sismológico

El concepto o principio de funcionamiento de un sistema de alerta temprana (SAT) aprovecha la diferencia de velocidades entre las ondas P y S, lo que brinda una ventana de tiempo entre la detección de la onda P y el arribo de la onda S para que el sistema tenga la posibilidad de realizar una alerta a la población y, por consiguiente, inicie protocolos de seguridad.

Un SAT diseñado para la detección de eventos sismológicos, de forma general, se compone de las siguientes partes. El primer componente de este sistema son las estaciones sismológicas, las cuales son dispositivos electrónicos encargados de realizar monitoreo de las señales sismológicas y realizar la detección de fenómenos sismológicos, estos dispositivos se distribuyen en grandes cantidades en una región del territorio y su funcionamiento en conjunto capturan información sobre la propagación de los fenómenos sismológicos a través de una determinada región (UNGRD, 2021). Cuando una estación activa su detección envía información a un sistema central por medio de uno o varios medios de comunicación, de acuerdo a condiciones de terreno, accesibilidad, infraestructura implementada y presupuesto, pueden ser más o menos sofisticadas. La concentración de la información proveniente de las estaciones es procesada por medio de algoritmos de estimación de trayectoria para posteriormente enviar una señal de activación a los medios de comunicación final hacia la población, el esquema de la Figura 3 evidencia la infraestructura que engloba lo mencionado anteriormente, y a su vez, la propuesta general del prototipo diseñado toma el esquema mencionado, este proyecto presenta una propuesta para el desarrollo del Hardware o estaciones de detección.

*Figura 3.*  
Modelo de infraestructura de un SAT



### 2.5. Nido Sísmico de los Santos, Bucaramanga

La definición de nido sísmico surge debido a la concentración inusual de eventos sísmológicos de forma continua. El nido sísmico de los santos se encuentra ubicado en la parte nor-oriental del territorio colombiano, en el departamento de Santander, municipio de los Santos, el cual se caracteriza por presentar una concentración de actividad sísmica a profundidades mayores a 120km y en promedio la magnitud de los eventos ocurridos es menor de 4.7, los cuales tienen origen a profundidades 140 km a 180km (Sepúlveda Jaimes y Cabrera Zambrano, 2018), la tomografía sísmica del nido se aprecia en la Figura 4.

## 3. Métodos y Materiales

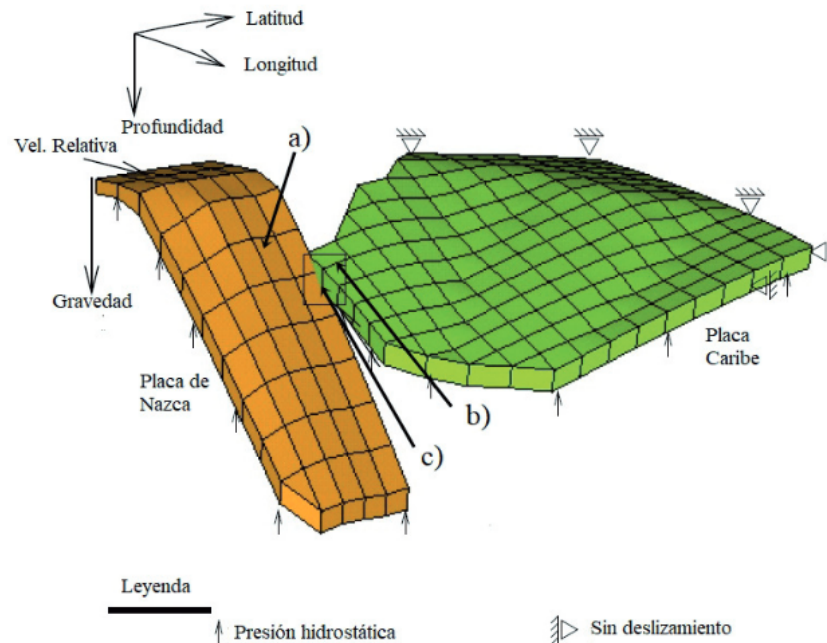
Junto con la empresa Subsuelo3D S.A.S. se elaboró un prototipo de estación de detección sísmológica SAT para este trabajo con modalidad de práctica empresarial. La intención del trabajo es realizar un acercamiento por medio de un prototipo Hardware, el cual permite evaluar el

desempeño del algoritmo de detección sugerido por la empresa y los canales que permitieron una comunicación óptima para la alerta temprana.

Para el concepto general de un SAT se hizo una breve revisión de las implementación de países como México y Estados Unidos para plantear un diseño o arquitectura piloto para el área metropolitana de Bucaramanga, Santander, Colombia (Suárez y Espinosa, 2018; Given *et al.*, 2018). Para el diseño del hardware se tomó como referente las especificaciones proporcionadas por el servicio geológico colombiano (Servicio Geológico, 2021). La empresa Subsuelo3D S.A.S. planteó requerimientos iniciales que determinaron el diseño del prototipo, tales como la limitación

Figura 4.

Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia)



Nota. Tomada de tomografía sísmica 3d del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia). Boletín de Geología, 2018

en la financiación del prototipo, integración de toda la arquitectura (dispositivo *stand alone*, es decir, que no requiera de dispositivos externos), sencillez y flexibilidad a futuro (adaptación de funcionalidades en software en lugar del uso de módulos hardware adicionales), no dependencia de terceros (ahora serán ajustados directamente por la misma empresa) y ahorro en infraestructura de comunicación (el no uso de radio frecuencia, en su lugar, hacer uso de comunicación 3G o Wi-Fi).

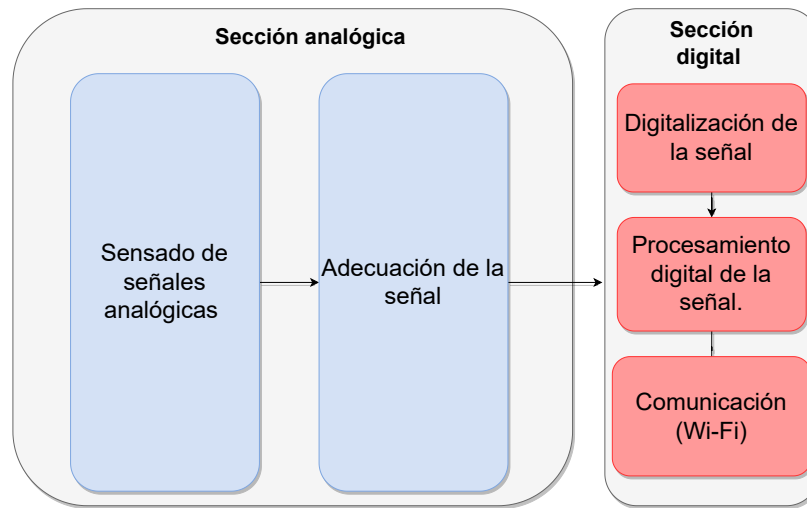
### **3.1. Propuesta General**

La presencia del nido sísmico de los Santos en cercanía del área metropolitana de Bucaramanga, presenta condiciones favorables para la implementación de un prototipo de estación de detección sismológica con el objetivo de medir y comprobar el tiempo de respuesta ante un evento sísmico. Para el desarrollo de este prototipo, inicialmente se realizó un estudio de las condiciones locales en cercanía del municipio de los Santos, lo que se resume en conocer las características en promedio de las ondas P para los eventos de interés que son perceptibles para la población. A partir de estas características se establecieron los requerimientos del dispositivo. A continuación, se presenta un resumen de la propuesta desarrollada con el objetivo de identificar las secciones que conforman el diseño, el cual se presenta en la Figura 5.

La Figura 5 está dividida en dos secciones principales, la sección analógica y digital. La división marca la diferencia de la naturaleza de las señales y procesos aplicados. También se aprecia el flujo del proceso por el que pasa la información capturada, iniciando por el sensado y adecuación de las señales por medio de geófonos tri-axiales y una serie de filtros activos respectivamente.

Figura 5.

Diagrama general del prototipo de estación de detección sísmológica



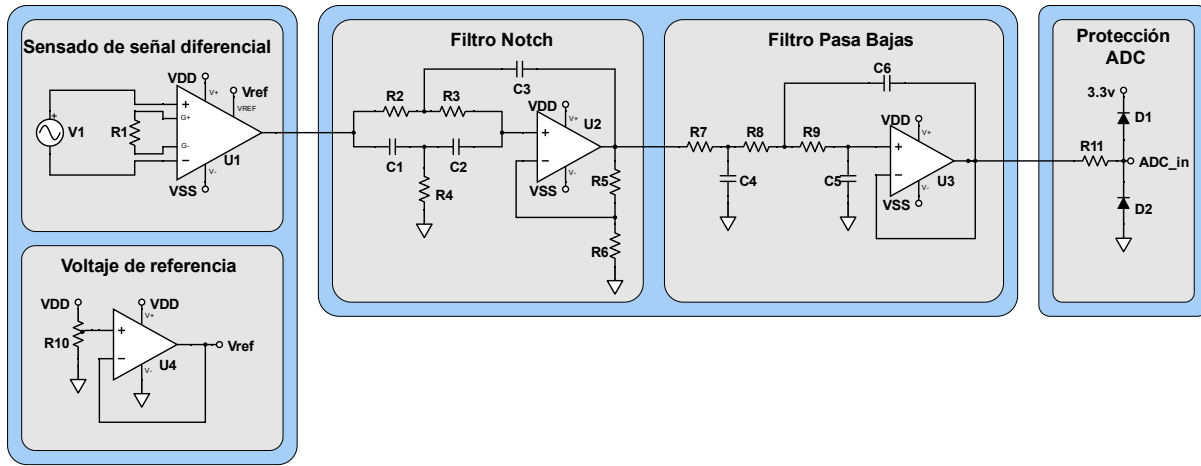
La etapa analógica tiene como objetivo acondicionar las señales captadas para su procesamiento digital. La preparación de las señales se lleva a cabo en 3 etapas de filtrado que limitan el ancho de banda de las señales, mitigando el ruido y permitiendo el paso de las frecuencias deseadas, adicionalmente, añade un nivel de tensión continua que permite aprovechar en mayor medida el rango dinámico del convertidor analógico-digital.

La etapa digital del prototipo es la encargada de realizar la digitalización de las señales, procesamiento de datos y envío de alertas. Las etapas que conforman esta sección están basadas en algoritmos y módulos de programación que en conjunto conforman un sistema embebido desarrollado en FreeRTOS<sup>1</sup> para ejecutarse en un microcontrolador. Finalmente, el envío de alertas

<sup>1</sup> FreeRTOS es un kernel de tiempo real (o arbitrador de tiempo real) sobre el que se pueden construir aplicaciones embebidas. Las aplicaciones embebidas pueden ser construidas para cumplir con sus requerimientos de tiempo real. Permite organizar las aplicaciones organizarse como una colección de hilos de ejecución independientes.

Figura 6.

Topología del circuito analógico de un canal



Nota. Se presenta la topología para un canal. El diseño final está conformado por seis canales idénticos al expuesto

hace uso de servicios virtuales brindados por la compañía, donde la información entra en el flujo general del sistema SAT, para llevar la comunicación del evento a la comunidad objetivo.

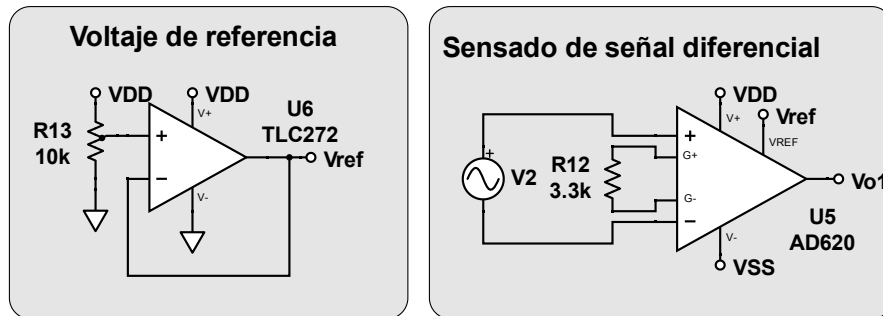
### 3.2. Propuesta Analógica

De acuerdo a los requerimientos brindados por la empresa para el diseño de la etapa analógica se presentan dos principalmente: brindar un ancho de banda de 100 Hz y una ganancia de 15 V/V, esto con la intención de amplificar una señal 200 mVpp y aprovechar en su totalidad el rango de medición del ADC. Adicionalmente, otro requerimiento por parte de la empresa fue un diseño que permitiera el uso de dos geófonos tri-axiales, lo que indica que el diseño analógico debe dar soporte a seis canales.

Conforme a los lineamientos brindados se planteó la topología presente en la Figura 6, la

Figura 7.

Etapa 1: circuito de sensado diferencial



topología presentada se encuentra dividida en 3 secciones principales, adaptadas a las características eléctricas de las señales de interés, desde la señal diferencial, amplificación, filtrado y circuito de protección para el convertidor analógico digital (ADC).

### 3.2.1. Sensado de Señal Diferencial

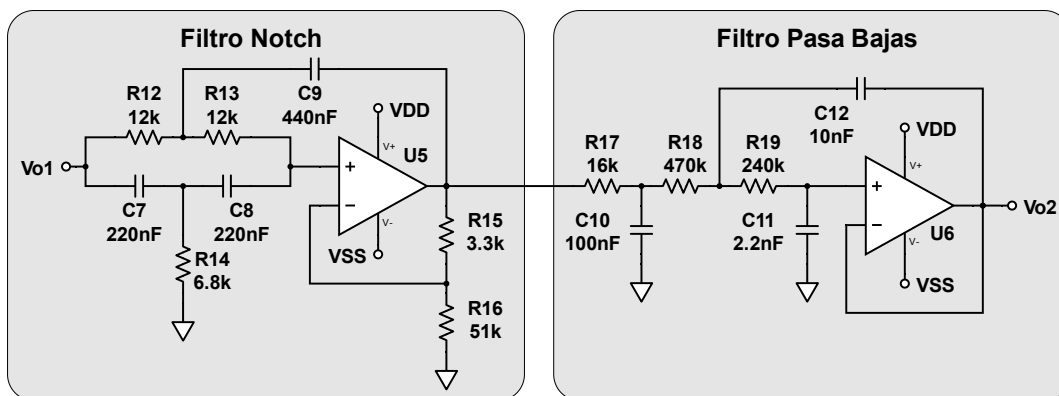
Una vez establecida la señal que procesa la etapa analógica se propuso la topología mostrada en la Figura 7, donde se aprecia la composición de un amplificador de instrumentación AD620 (Analog Devices, 2011), que convierte la señal diferencial V2 proveniente de uno de los canales del geófono tri-axial a terminación única Vo1, luego, a la señal de terminación única se le aplica una ganancia de factor 15 y un offset de 1.65 V con la intención de adecuar la señal para aprovechar el rango dinámico del ADC.

**3.2.2. Etapa de Filtrado**

Una vez se amplifica la señal se realiza un filtrado de 2 pasos. En la primera etapa se filtra el ruido causado por la interferencia de la red eléctrica (60 Hz) y la segunda etapa se muestra un filtro pasa-bajas con frecuencia de corte de 100 Hz para eliminación del ruido de alta frecuencia (Requerimiento dado por Subsuelo3d S.A.S), la Figura 8 muestra el esquema de los circuitos implementados. La función de transferencia del filtro Notch se muestra en la ecuación 1, para una frecuencia de corte de 60 Hz, un factor de calidad 0.66 y un ancho de banda de 90 Hz se obtienen como resultado los siguientes valores para resistencias y capacitores: R14 = 12kΩ, R15 = 12kΩ, R17 = 3.3kΩ, R16 = 6.8kΩ, R18 = 51kΩ, C7 = 220nF, C8 = 220nF, C9 = 440nF.

$$H(\omega) = K \frac{1 - (\omega/\omega_o)^2}{1 - (\omega/\omega_o)^2 + (j\omega/\omega_o)/Q}; K = 1 + \frac{R_{17}}{R_{18}}; \omega_o = \frac{1}{R_{14}C_{17}} \quad (1)$$

Figura 8.  
Etapa 2: circuito de filtrado



La función de transferencia de tercer orden para el filtro pasa-bajas se muestran en la ecuación 2. Asegurando una ganancia unitaria se pueden extraer los valores de resistencias y capacitancias, indicados a continuación:  $R19 = 16k\Omega$ ,  $R20 = 470k\Omega$ ,  $R21 = 240k\Omega$ ,  $C10 = 0.1\mu F$ ,  $C11 = 0.01\mu F$ ,  $C12 = 0.0022\mu F$ .

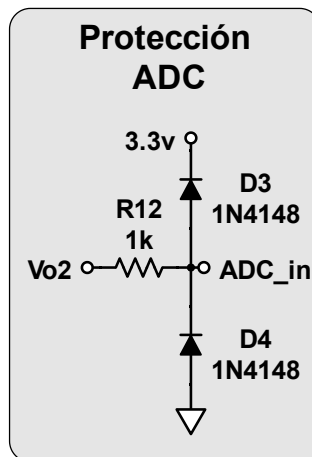
$$G(s) = \frac{251853642.81109}{s^3 + 1275.7092198582s^2 + 805226.46679562s + 251853642.81109} \quad (2)$$

### 3.2.3. Circuito de Protección

En esta etapa el circuito se encarga de proteger las entradas del dispositivo digitalizador ante tensiones mayores a 3.3 V, así como también de tensiones negativas en caso de fallo en las

Figura 9.

Etapa 3: circuito de protección



etapas anteriores, este circuito se evidencia en el esquema de la Figura 9. En caso de falla por tensiones  $V_{o2} > 3.3 V$  se activará el diodo superior D3 permitiendo el flujo de corriente y fijando una tensión de  $3.3 V$  en el nodo ADC\_in y en caso contrario  $V_{o2} < 0 V$  se activar el diodo inferior D4 permitiendo el flujo de corriente y fijando el nodo ADC\_IN a  $0V$ , en ambos casos la resistencia de  $1k\Omega$  limita la corriente que circula por la salida del amplificador LM358.

### 3.3. Propuesta Digital

Una vez la señal pasa por el circuito de adecuación analógico se encuentra lista para iniciar el procesamiento dentro del microcontrolador. Como se discutió en la sección 2, las estaciones de detección concentran múltiples funcionalidades que cumplen con los requerimientos de captación de la señal, procesamiento y transmisión óptima de la eventualidad para el proceso de prevención de riegos y desastres, por lo tanto la selección de un dispositivo económico, con la capacidad computación necesaria y con conectividad Wi-Fi (Ver Figura 10) es una pieza clave del diseño.

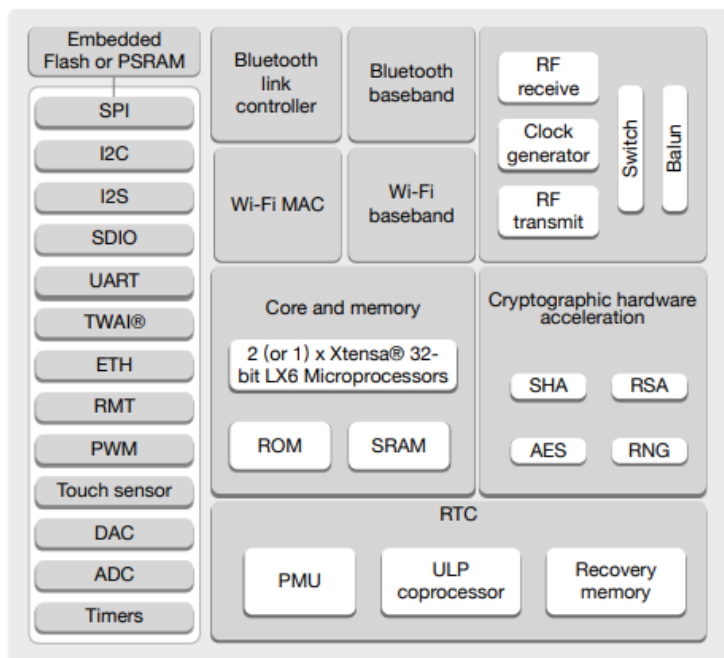
Dadas estas condiciones se seleccionó el microcontrolador ESP32 que reúne las capacidades mencionadas y adicionalmente brinda una plataforma flexible para el desarrollo de distintas características del prototipo (Espressif, 2021a,b).

El desarrollo del software se desarrolló en la plataforma ESP-IDF v4.4.2 la cual contiene los componentes recomendados por el fabricante para la implementación de software para el ESP32. La implementación se estructuró en las siguen tres secciones, el esquema de las herramientas del software se puede apreciar en la Figura 11.

El desarrollo del software inicio implementando cada funcionalidad, comprobando su funcionamiento por separado para eventualmente integrar cada componente en una estructura de administración y comunicación de procesos basada en FreeRTOS. En términos generales la estructuración del software cuenta con un proceso general que se encarga de gestionar la operación correcta de procesos secundarios y el intercambio de datos entre estos.

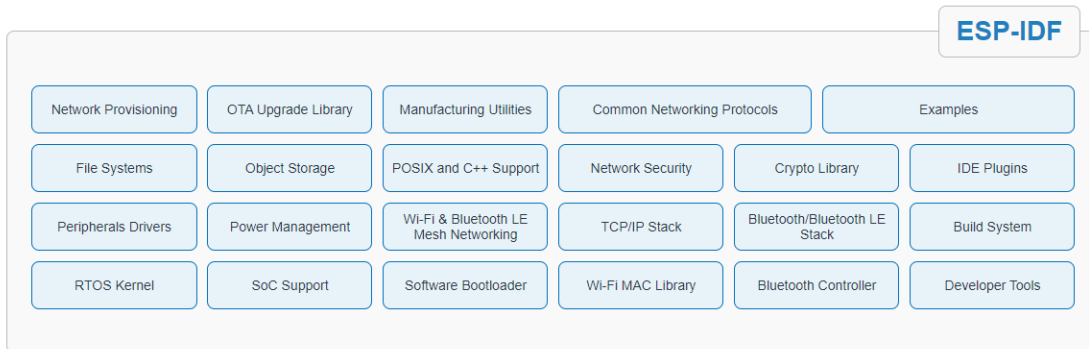
De forma general el código desarrollado se divide en varias tareas como se puede observar en la Figura 12. El dispositivo cuenta con dos fases de trabajo, una fase inicial o *start-up* y una operativa. En la fase *start-up* el dispositivo enciende, y luego realiza una serie de instrucciones para configurar los procesos que ejecutará, esto incluye la creación de tasks , elementos de control como

*Figura 10.*  
Diagrama funcional ESP32



*Nota.* Tomada de Espressif Systems, 2021, de Esp32 series: Datasheet, specifications

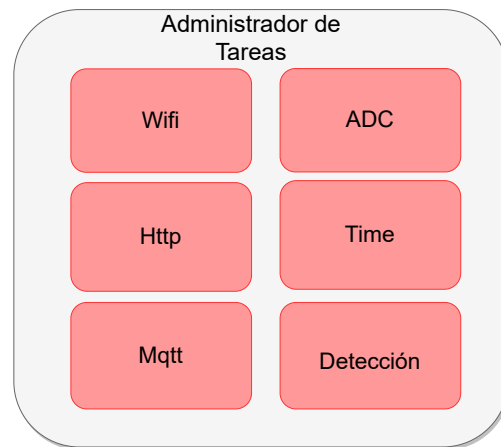
*Figura 11.*  
Componentes de software y características



*Nota.* Tomada de Espressif Systems, 2015-2022, Official IoT Development Framework

EventGroups y Queues para el envío de datos (Amazon, 2017). Luego, el dispositivo entra la fase operativa, donde se desarrolla la lógica del funcionamiento, inicia con la instrucción de conectarse a la red Wi-Fi especificada en el archivo de configuración del proyecto, y finaliza con la activación de la configuración del reloj del sistema a través de la sincronización SNTP luego de realizar la corrección. Posteriormente, pasa a ejecutar las funciones principales del dispositivo, donde se observa un comportamiento cíclico entre las funciones de toma de datos y el algoritmo de detección de eventos, donde este último activa el envío de una alerta si las señales capturadas cumplen los parámetros del criterio de detección. Adicionalmente, la empresa Subsuelo3D S.A.S. sugirió incluir una funcionalidad que permitiera mantener un acceso remoto al dispositivo, brindado la capacidad de hacer ajustes al algoritmo de forma remota.

*Figura 12.*  
Funcionalidades implementadas



### ***3.3.1. Digitalización de la señal***

El proceso de digitalización se llevó a cabo a los seis canales de la etapa analógica de forma simultánea configurando el ADC\_UNIT\_1 a una resolución de 12 Bits con una atenuación de *11db* para capturar un rango máximo de tensión. El ADC cuenta con distintos modos de opción, para esta implementación en modo de operación continuo se necesito configurar el controlador DIG SAR ADC para hacer uso de DMA y de esta forma definir una frecuencia de muestro de 1kHz con un tamaño de *buffer* de 1024 muestras por cada canal (Espressif, 2021b). Cada canal posee un *buffer* destinado al almacenamiento de los datos, una vez han sido llenados se envía una señal al *manager* para activar la siguiente fase del proceso.

### ***3.3.2. Algoritmo de Detección de Eventos Sismológicos***

El algoritmo de detección implementado consta de dos condiciones, estas condiciones deben superar los umbrales fijados para cumplir el criterio de envío de alarma (De correlación y STA/LTA). La primera condición se encarga de calcular el coeficiente de correlación entre los canales que comparten el mismo eje, luego, si cada par de canales supera el umbral, la condición es verdadera y activa la segunda; la segunda condición calcula el valor STA/LTA de cada señal, acá se verifica si cada una de las señales supera los umbrales, si es cierta, la condición se satisface y se envía la alerta.

### ***3.3.3. Sincronización Temporal***

El Esp32 hace uso de *hardware timers* para mantener el tiempo del sistema operativo. Cuando el dispositivo se enciende, el tiempo del sistema operativo no se encuentra ajustado al tiempo correspondiente de la zona horaria de su ubicación, por lo que se usa la red *Simple Network Time Protocol* ó SNTP al momento de sincronizar, para esto es necesario configurar el servidor correspondiente al lugar de instalación. Esta característica es necesaria debido a que el dispositivo se encarga de almacenar información adicional del evento o *metadada*, como por ejemplo el *timestamp* en el cual guarda la información del tiempo en el que sucede el evento. La información es enviada junto con la alerta a los servicios proporcionados por la compañía para su posterior análisis.

### ***3.3.4. Conectividad Wi-Fi***

El acceso a servicios web es fundamental para el funcionamiento efectivo de este prototipo, ya que se proporciona el acceso a los canales de transmisión del sistema de alerta. Como un requerimiento inicial, la compañía enfatizó en implementar la comunicación Wi-Fi como alternativa al desarrollo de infraestructura de comunicación propia, por lo tanto, brinda ventajas como la reducción en la complejidad y recursos. La dependencia de un solo mecanismo de comunicación representa una desventaja que se puede mitigar brindando un acceso estable y de baja latencia para la transmisión óptima de la alerta.

### ***3.3.5. Envío de Alerta***

Brindando acceso a internet estable y de baja latencia, el envío de las alertas toma un tiempo menor a  $1\text{ s}$  para que no afecte en mayor medida la recepción oportuna de la alerta. Para realizar el envío de la alerta se configura un cliente http que envía una petición a un *endpoint* brindado por la compañía, dónde se construye un archivo de texto tipo *JSON* que contiene parámetros necesarios para el uso del servicio. Al ser una petición http se espera recibir el código de respuesta por parte del servidor a partir del cual se comprueba si la petición se realizó con éxito, o por el contrario, falló; en caso de falla, se guarda el evento localmente como mecanismo de evaluación de la estabilidad del servicio de conectividad.

### **3.3.6. Acceso Remoto**

Esta funcionalidad surge a partir de la necesidad de interactuar con el dispositivo remotamente, debido a que el lugar de instalación de las estaciones, en algunos casos, cuentan con acceso limitado a operarios por tiempos prolongados, por lo tanto esta funcionalidad permite realizar ajustes al algoritmo de detección de cada estación permitiendo ajustar el comportamiento a las condiciones locales. adicionalmente permite ver un reporte simplificado del resultado del algoritmo en tiempo real.

### **3.4. Base de Datos: Origen de los Datos**

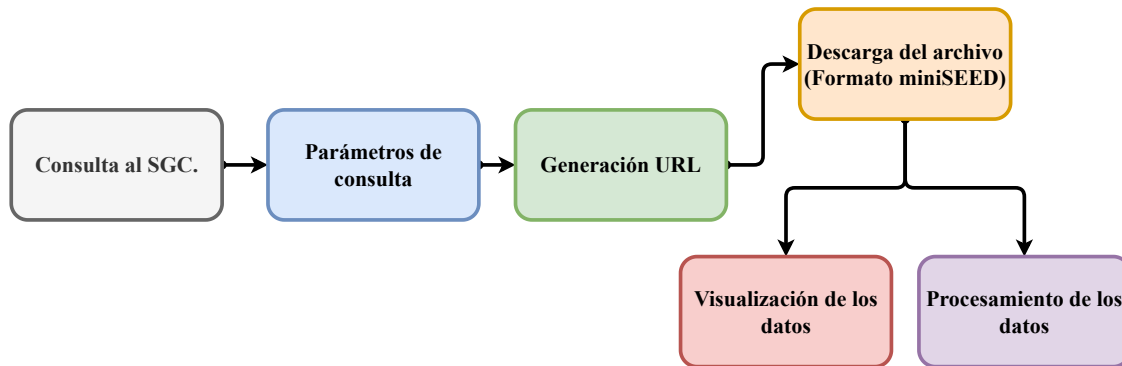
Como ya se ha mencionado en los requerimientos del trabajo, un tema a cubrir es la zona de interés para captar actividad sismológica. La zona de interés es el municipio de los Santos, para poder monitorizar esa zona, la estación con mayor cercanía al nido es la de Barichara, Santander, pues esta es una de varias zonas monitorizadas por el servicio geológico colombiano (SGC) (Servicio Geologico, 2022b).

Aprovechando la disponibilidad de los datos en a través de la API proporcionado por el portal de Servicio de Descarga de Datos de Forma de Onda del SGC se descargó la información, el esquema de la Figura 13 muestra el flujo de cómo se obtuvieron los datos y la Figura 14 muestra el código implementado para hacer la petición https para descargar el set de datos.

Con el código en Python y con la consulta en la base de datos en el SGC se procedió a descargar los eventos, como este proceso se hizo de forma manual el set de datos usado contiene

Figura 13.

Esquema para obtención de los datos



50 eventos diferentes, la Figura 15 muestra un ejemplo de evento descargado, cada evento está conformado por tres canales (1 canal por eje). Se observó la forma de onda para comprobar que no fuese un evento difícil de detectar, para ello se establecieron los siguientes parámetros (metadatos) para la descarga:

1. Ubicación Barichara (BAR2, según la documentación).
2. Magnitud mayor a 2.2 hasta magnitud 4.5 (en escala de Richter).

Figura 14.

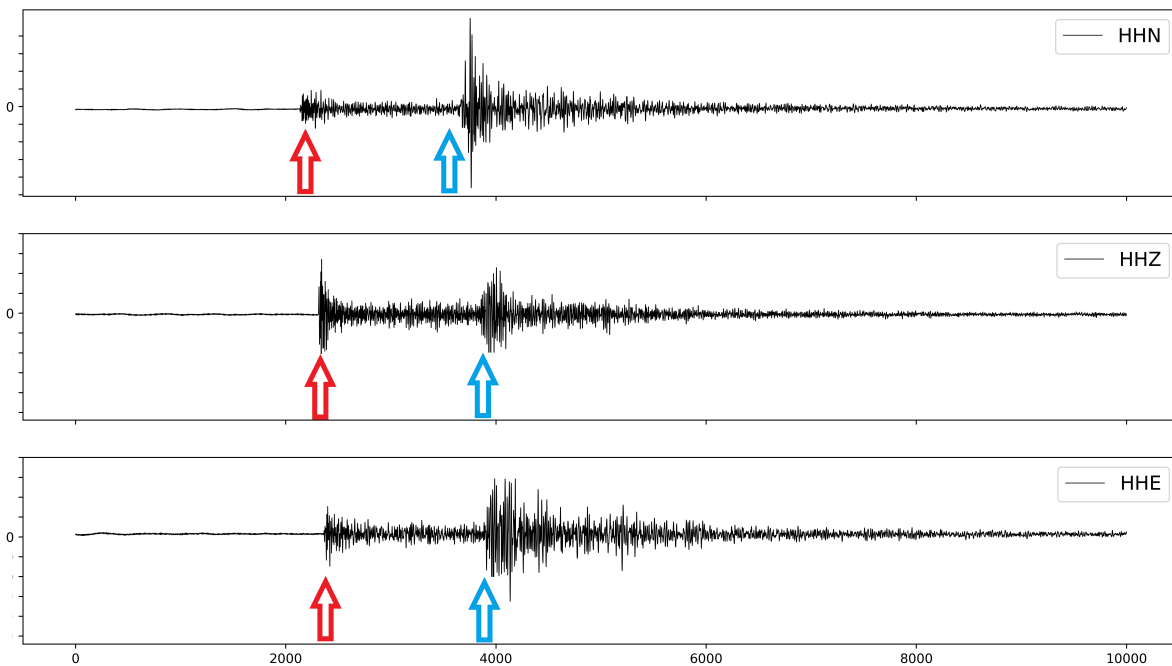
Código en python para obtener el set de datos

```

def dowloandEvents(start,end,mag,Plt=True,save=True,station='BAR2'):
    """
    Esta función permite descargar miniSeed con las formas de ondas desde el SGC.
    los parámetros para la búsqueda (y como usarlos) son los siguientes:
    start: '2020-04-01T06:47:58',end: '2020-04-01T06:50:38',station: 'BAR2',Plt: True, save : True
    Se debe verificar que exista el evento en la página del servicio geológico colombiano:
    https://www.sgc.gov.co/sismos
    Con decargar dos minutos es más que suficiente para observar los frentes de ondas (P y S)
    """
    st = read('http://sismo.sgc.gov.co:8080/fdsnws/dataselect/1/query?starttime='...
            +start+'&endtime='+end+'&network=CM&sta='...
            +station+'&cha=HH?&loc=00&format=miniseed&nodata=404')
  
```

3. Tiempo de duración de la señal 120 segundos (De los eventos descargados se comprobó que era tiempo suficiente para observar el evento completo en sus tres ejes).
4. Tiempo de inicio y final de la señal.
5. Canales HHN,HHZ,HHE los cuales provienen del sensor de velocidad de tiempo promedio.
6. Sensor de velocidad de banda ancha (00 según la documentación) (Servicio Geologico, 2022a).

*Figura 15.*  
Ejemplo de evento sísmológico



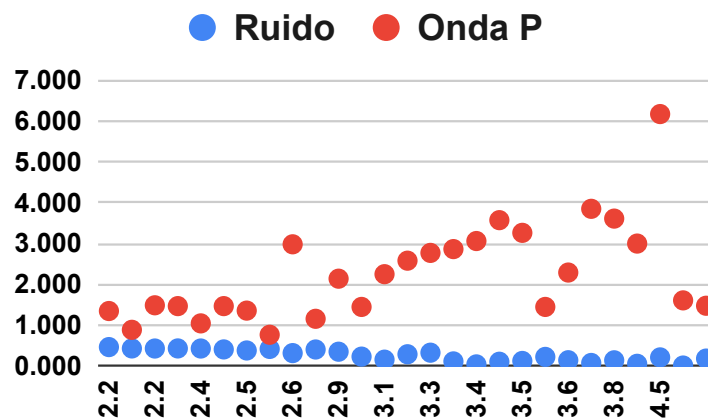
*Nota.* Ejemplo de evento sísmológico. Compuesto por tres canales (HHN,HHE,HHZ). La flecha roja representa llegada de la onda P y la azul la onda S

### 3.5. Algoritmo de Detección Sísmica

La detección automática de eventos en tiempo real para redes sísmicas o más comúnmente conocido como trigger STA/LTA, el cual funciona con promedio ventanas de corta duración y promedios de ventanas de larga duración. El algoritmo básicamente funciona de la siguiente forma: las ventanas de larga duración (LTA) se encarga de calcular la amplitud de ruido sísmico promedio actual (a lo largo del tiempo), a su vez, las ventanas de corta duración (STA) miden la amplitud “instantánea” de la señal sísmica y vigila los terremotos o eventos sismológicos (Houliston *et al.*, 1984).

La interpretación de un LTA alto puede indicar dos casos, en un primer caso indica que el arribo está presente ya que presenta altas variaciones en la amplitud de la señal sismológica en un

Figura 16.  
Ejemplo de criterio de elección del umbral



Nota. A partir del análisis ST/LTA de ruido y la amplitud de la señal se estima el umbral, a partir de la dispersión de estos datos un ejemplo sería relación mayor a 1

corto periodo de tiempo; y en segundo caso, puede deberse al ruido que puede aumentar por un largo periodo de tiempo. Dada esta situación, es necesario recolectar información adicional para discriminar entre el ruido y el arribo de la señal, acá es donde el STA cubre su importancia, pues, al analizar menor cantidad de muestras, se observan los cambios de amplitudes en ventanas cortas de tiempo.

Las ecuaciones 3 y 4 permiten calcular los promedios de una señal con  $N_S$  y  $N_L$  muestras, donde  $N_S < N_L$ . Para que el algoritmo sea funcional, se establece el término Ratio, el ratio es la relación entre la ventana de corta duración (STA) contra la ventana de larga duración (LTA), el funcionamiento básico del algoritmo se concentra en encontrar un umbral para la activación de los canales que llegan al dispositivo (6 canales, 3 canales por geófono) esto es conocido como Ratio (Ver ecuación 5), ya que al existir ruido sísmico (y cada ruido es fuertemente dependiente de la zona de interés) se deben revisar para el set de datos específico.

$$STA = \frac{1}{N_S} \sum_{n=1}^{N_S} y_{k,n} \quad (3)$$

$$LTA = \frac{1}{N_L} \sum_{n=-N_L}^0 y_{k,n} \quad (4)$$

$$Ratio = \frac{STA}{LTA} \quad (5)$$

### 4. Análisis y Resultados

En este capítulo se abordan los temas de presentación y discusión de los resultados del desarrollo del proyecto. Se inicia con la simulación de los circuitos propuestos junto a pruebas que demuestran el correcto funcionamiento, luego se muestra la selección del dataset y la respectiva validación del algoritmo de detección, para finalmente, mostrar el montaje del prototipo.

#### 4.1. Simulaciones de Etapa Analógica

De acuerdo con lo establecido en el capítulo 3 (especificaciones de diseño) se procede a establecer la evidencia del cumplimiento de los requerimientos mediante la topología analógica descrita en el capítulo 3.2.

Figura 17.  
Esquemático: circuito diferencial

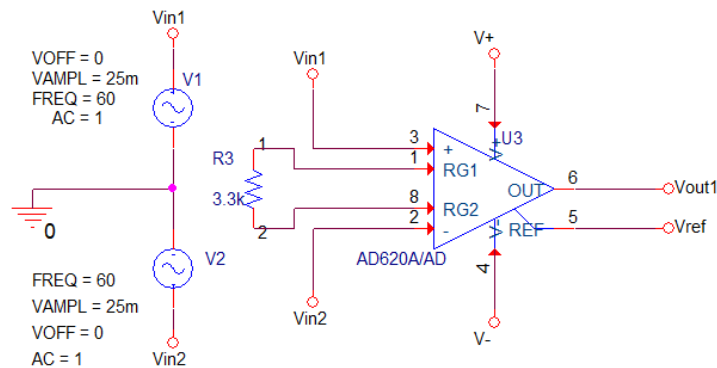
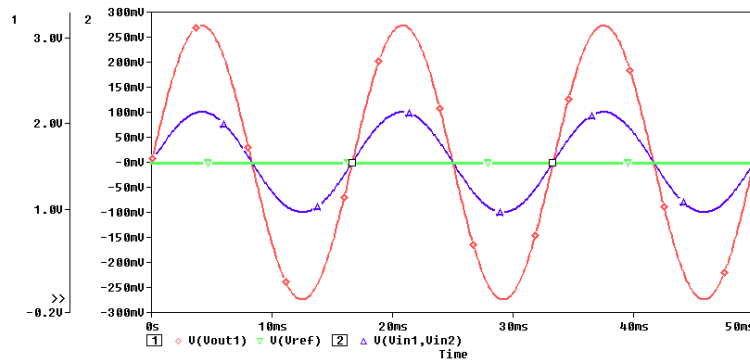


Figura 18.

Simulación circuito amplificador diferencial



Nota. El amplificador de instrumentación brinda una ganancia de 15 V/V (Línea roja) y una tensión de referencia de 1.62 V (Línea Verde). La línea azul representa la entrada de 200mVpp

#### 4.1.1. Sensado de Señal Diferencial

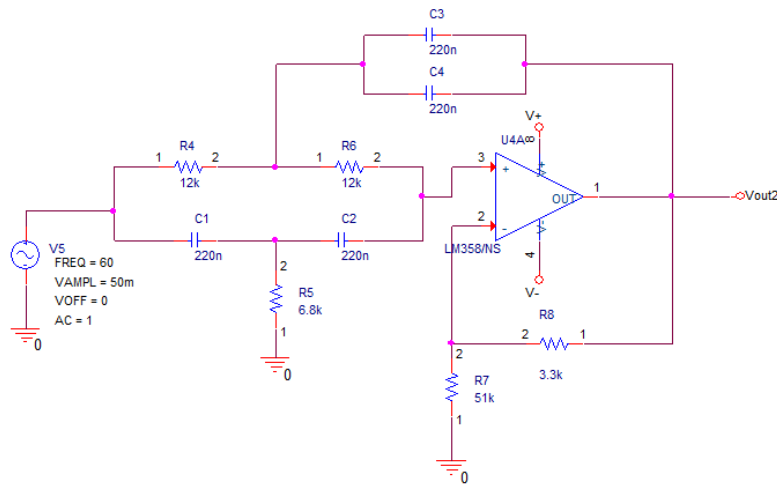
A continuación se presenta la simulación de la etapa diferencial como se muestra en la Figuras 17 y 18, en esta etapa, la intención es verificar el correcto funcionamiento respecto a los requerimientos, los cuales son: para una señal de entrada (Línea azul) se espera una ganancia de 15 V/V (Línea roja) con un nivel de continua de 1.62 V (Línea verde) para aprovechar el rango de adquisición del conversor analógico digital.

#### 4.1.2. Etapa de Filtrado

Esta etapa se compone de dos filtros individuales, donde uno se encarga de la eliminación de ruido ocasionado de la red eléctrica (60 Hz), denominado filtro de banda angosta o *Notch*; y la segunda etapa, un filtro pasa-bajas para reducir el ruido de alta frecuencia mayor a 100 Hz.

Figura 19.

Esquemático: circuito notch



**4.1.2.1. Filtro Notch.** De acuerdo a los valores calculados mediante la ecuación 1, se realizaron las simulaciones del circuito mostrado en la Figura 19. Adicionalmente, se puede observar en análisis frecuencial del mismo (Ver figura 21), del cual se tienen las siguientes mediciones: ganancia en banda plana de  $0,5\text{ db}$ , frecuencia central del filtro de  $60\text{ Hz}$ , ancho de banda de  $98\text{ HZ}$  y un factor de calidad de  $0,66$ .

Figura 20.

Esquemático: filtro pasa-bajas

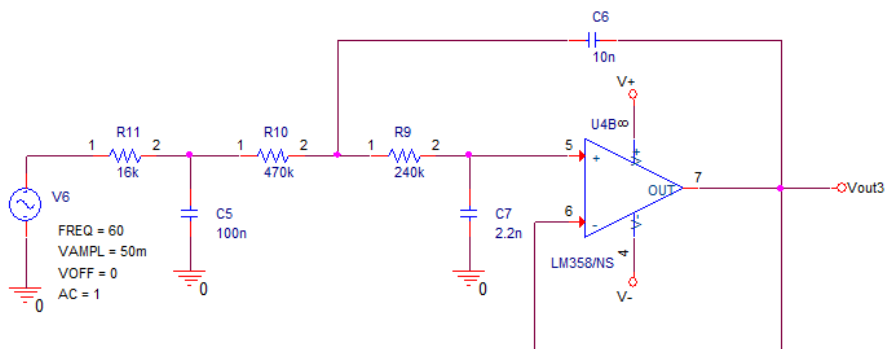
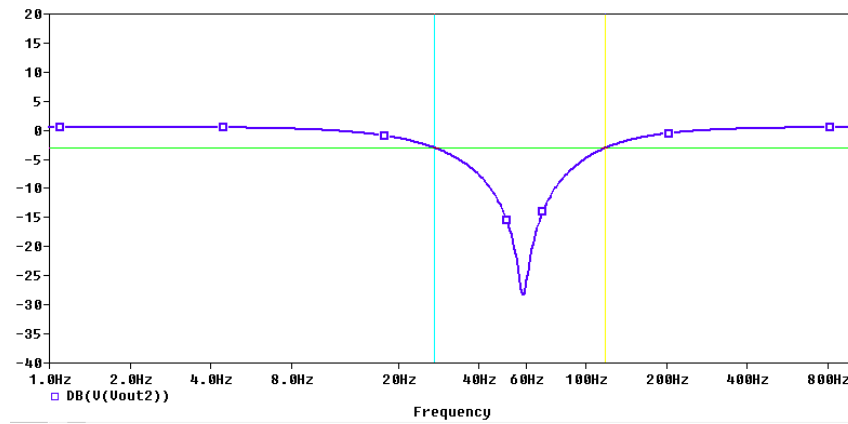


Figura 21.

Respuesta en frecuencia del filtro notch



**4.1.2.2. Filtro Pasa-Bajas.** Mediante la ecuación 2 se describió el comportamiento adaptado de las especificaciones indicadas en la sección 3.2 como la frecuencia de corte de  $100\text{ Hz}$ , en la Figura 20 se aprecia el esquemático implementado y la Figura 22 muestra la respuesta en frecuencia del filtro.

Figura 22.

Respuesta en frecuencia del circuito pasa-bajas

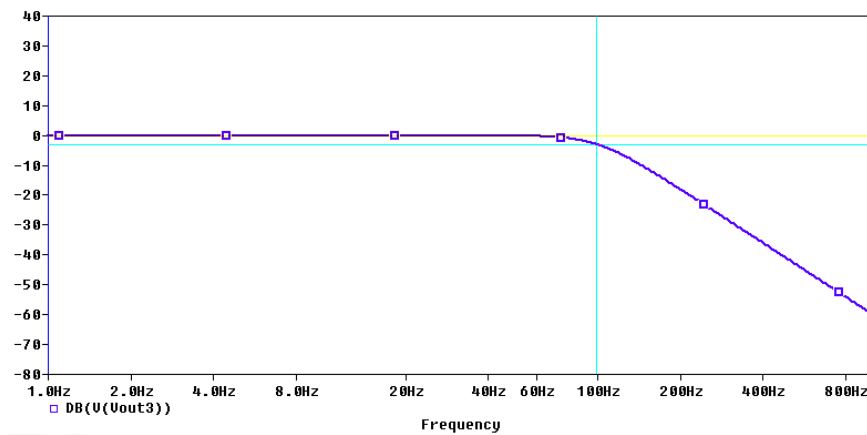
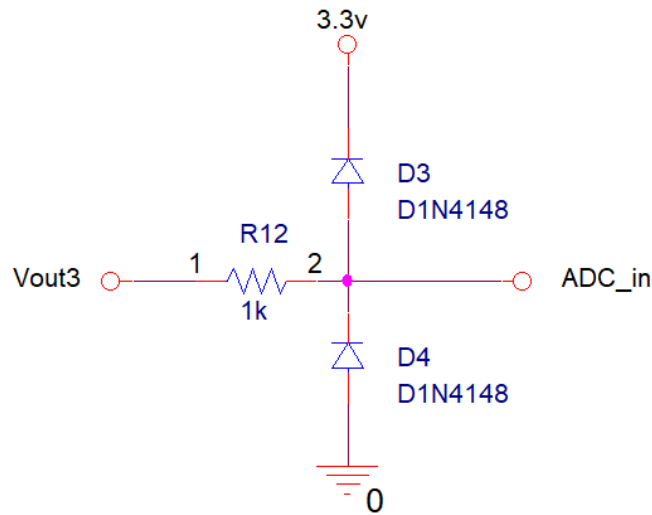


Figura 23.

Esquemático: circuito de protección



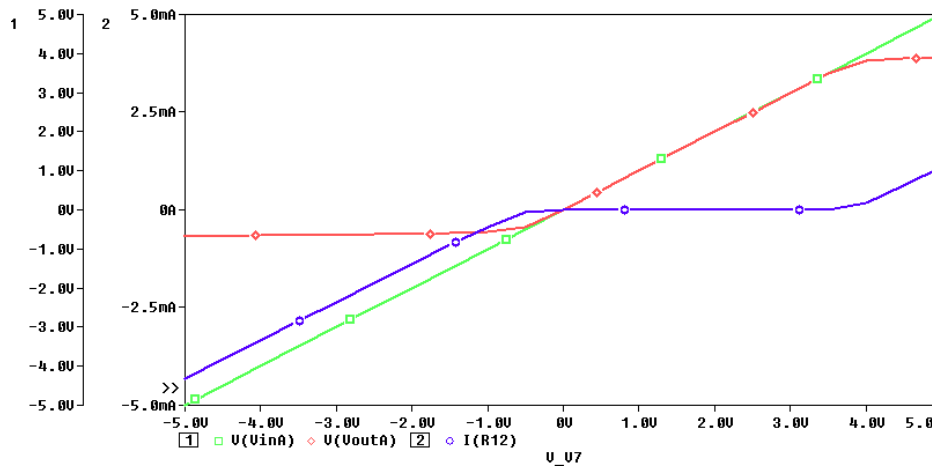
#### 4.1.3. Circuito de Protección

En la Figura 23 se observa el esquemático del circuito de protección, y en la Figura 24 su respectiva simulación, para los rangos seguros de operación se aprecia un comportamiento lineal y cuando se superan los valores permitidos por el fabricante los diodos se activan y limitan la tensión en ADC\_in a niveles seguros (Línea roja), el comportamiento de la corriente (Línea azul) se nota que no supera un consumo mayor a 5 mA.

#### 4.2. Pruebas de Adquisición de Datos

Un vez comprobada la funcionalidad de los circuitos se realiza un montaje inicial para verificar su funcionamiento en conjunto (Ver Figura 25), el montaje cuenta con 6 canales analógicos (Ch N, Ch Z, Ch E), cada geófono usa 3 de estos (Technologies, 2021), Vref hace uso de un po-

Figura 24.  
Simulación circuito de protección



Nota. Comportamiento de la tensión ADC<sub>in</sub> (Línea roja) y corriente en R<sub>12</sub> (Línea azul) ante variaciones de Vout<sub>3</sub> en el rango de -5 a 5 V (Línea verde)

tenciómetro para el ajuste del nivel de referencia ó DC en la etapa de la amplificación diferencial, finalmente el ESP32 es encargado del procesamiento digital.

Figura 25.  
Montaje del prototipo de detección

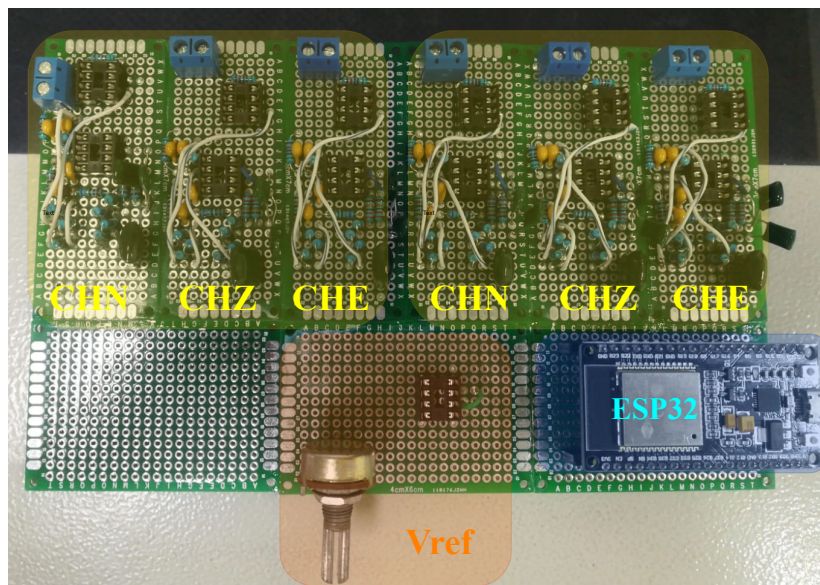


Tabla 1

*Medidas del circuito de sensado*

Amplitud Señal de Entrada (mV)	Amplitud Señal de Salida (V)	Amplificación (V/V)	Amplificación (dB)	Error (%)
10.95	0.1369	12.49	21.93	16.73
23.01	0.3191	13.86	22.83	7.6
38.89	0.5829	14.98	23.51	0.13
48.04	0.7457	15.52	23.81	3.46
102.51	1.5917	15.52	23.82	3.46
122.36	1.9058	15.57	23.84	3.8
151.01	2.3844	15.78	23.96	5.2
170.60	2.6986	15.81	23.98	5.4
199.75	3.168	15.86	24.00	5.73

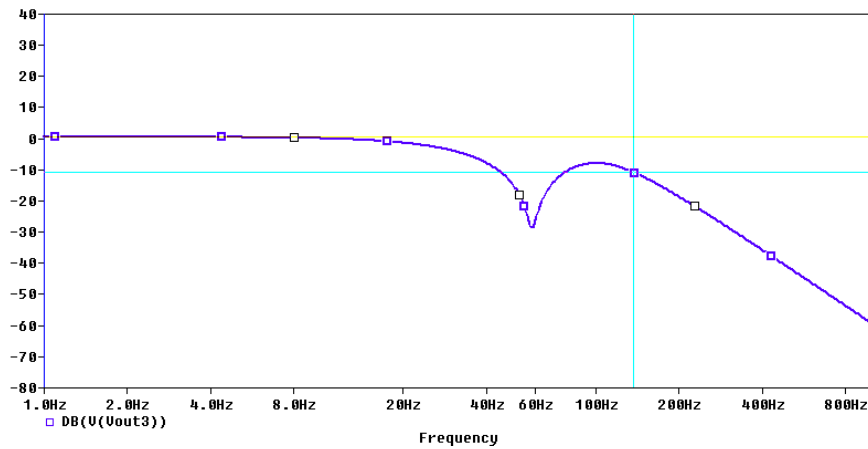
Se realizaron pruebas en cada una de las etapas del circuito analógico, La Tabla 1 muestra la respuesta del circuito ante distintas amplitudes de la señal de entrada, a través de los resultados, se observan las variaciones menores al 5% en la ganancia desde 40mV hasta 130mV de tensión pico a pico de la señal de entrada. Sin embargo, la tensión máxima de 200mV se ajusta al rango de medición seguro para el ADC.

Tabla 2

*Comportamiento del filtro notch, para una entrada de 150mV*

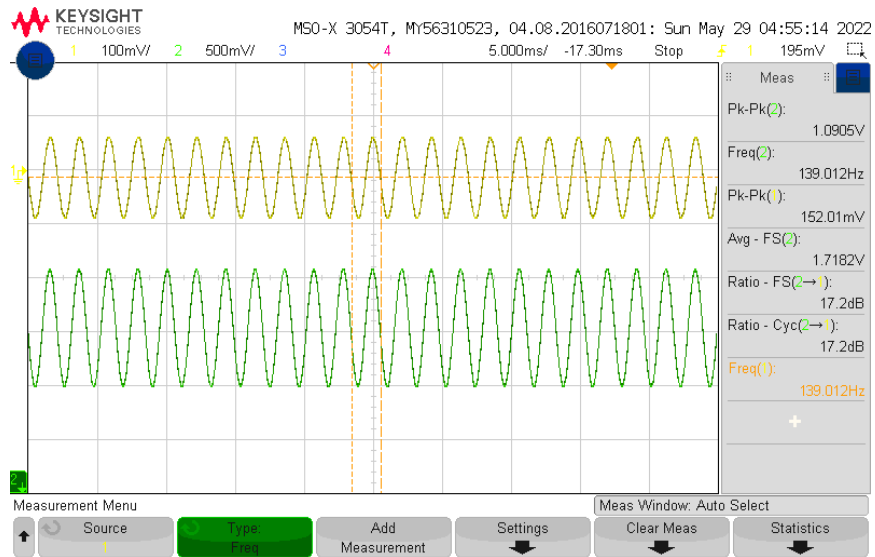
Frecuencia (Hz)	Señal de salida (V)	Magnitud (V/V)	Magnitud (dB)
25	1.8015	0.755	-2.44
30	1.5528	0.651	-3.72
40	1.0905	0.457	-6.80
50	0.525	0.220	-13.15
60	0.138	0.0578	-24.76
70	0.422	0.176	-15.08
80	0.763	0.319	-9.92
90	1.0503	0.440	-7.13
100	1.2814	0.537	-4.82
120	1.6231	0.680	-3.34

Figura 26.  
Simulación efecto en cascada de los filtros



Continuando con la siguiente etapa (etapa de filtrado) se observan los resultados, para una entrada de 150 mV la ganancia del amplificador de instrumentación proporciona una entrada de tensión de 2.384V, luego, la señal pasa por el circuito de filtrado, los resultados se aprecian en la Tabla 2, de los resultados tabulados se comprueba la atenuación entre las frecuencias de corte

Figura 27.  
Frecuencia de corte filtro pasa-bajas



30Hz a 120Hz con un máximo centrado en la frecuencia a 60 Hz, así mismo comprobando el ancho de banda de 90 Hz.

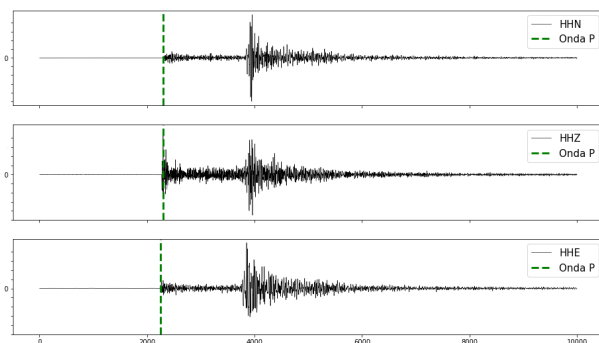
La Figura 26 presenta la simulación del efecto en cascada de los filtros, del que se puede extraer el ancho de banda final (136,77 Hz) y la Figura 27 muestra la respuesta en la implementación al final del filtrado, de esta figura se puede apreciar el mismo efecto de los circuitos en cascada donde el ancho de banda final está en 139,012 Hz a partir de esta frecuencia se observa un caída de tensión de 60 dB por década.

### 4.3. Validación del Algoritmo de Detección

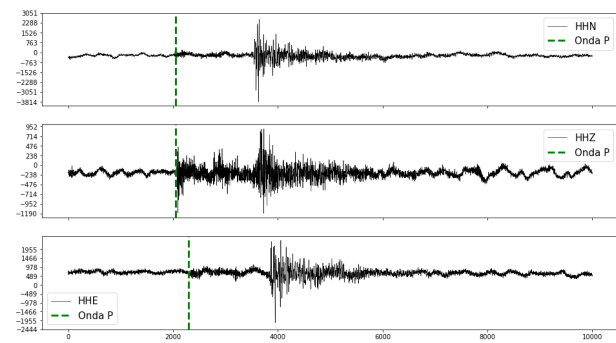
El primer paso para validar la detección, fue consultar la base de datos obtenida (Para información de la base de datos consultar la sección 3.4), de allí se revisó cada uno de los eventos, luego se filtraron los datos que no presentaban información relevante. La base de datos se redujo a 46 eventos, la cantidad de muestras se redujo a 10000 muestras.

Figura 28.  
Ejemplos de funcionamiento del algoritmo

(a) Detección evento de magnitud 3.6



(b) Detección evento de magnitud 2.3



La lógica del algoritmo implementado es la detección automática de eventos en tiempo real para redes sísmicas o más conocido como método STA/LTA (Houliston *et al.*, 1984), el algoritmo para la detección puede consultarse en el repositorio adjunto en la página 57 de los anexos. Del conjunto con 46 eventos se seleccionaron 27 eventos libres de interferencias y ruido de alta frecuencia, los cuales fueron pieza fundamental para validar el funcionamiento correcto de algoritmo, para así observar como los distintos valores de configuración (tamaño de buffers) del algoritmo afectaron el desempeño. El segundo conjunto con 19 eventos presentaron diferentes perturbaciones como oscilaciones prolongadas y/o un aumento significativo del ruido. Del conjunto de 19 eventos se permitió conocer el desempeño del algoritmo en condiciones no ideales.

Se definieron los valores de los umbrales a partir del análisis de los resultados del primer conjunto de datos, los cuales se pueden observar en la Tabla 3, a partir de esta tabla se obtuvieron mapas de dispersión de los resultados para las magnitudes 2.0 a 4.5, del análisis de la figura 29 se observó la tendencia de los datos y se definió un umbral entre el ruido y el arribo de la onda P, establecieron los siguientes umbrales 0.6 para el canal N, 1 para el canal Z y por último 0.8 para el canal E, con esta selección se garantizó una activación del 81.4%, 92,5% y 62,9% para los canales N, Z y E respectivamente.

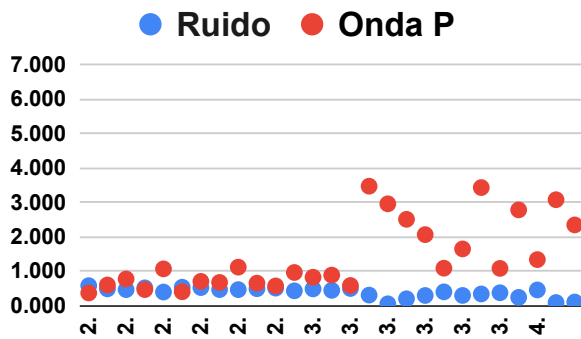
Ahora, con los umbrales definidos, se establecieron las pruebas de desempeño con el segundo conjunto de datos (Ver Tabla 4). Se observó que no es simultáneo para los 3 canales, existen cambios de fase en los distintos canales debido a la naturaleza del fenómeno lo que ocasiona, por lo tanto el envío de la alerta es desencadenado cuando 2 o más canales superen los umbrales. A partir

de esta condición el algoritmo presenta una efectividad de 42.1%. En la Figura 28 se presentan dos ejemplos de detección del algoritmo, para un caso exitoso de magnitud 3.8 y otro caso exitoso de magnitud 2.3 en escala de Richter, lo importante acá es resaltar que a pesar de la presencia del ruido y/o interferencia en la señal, el algoritmo es capaz de brindar una detección correcta.

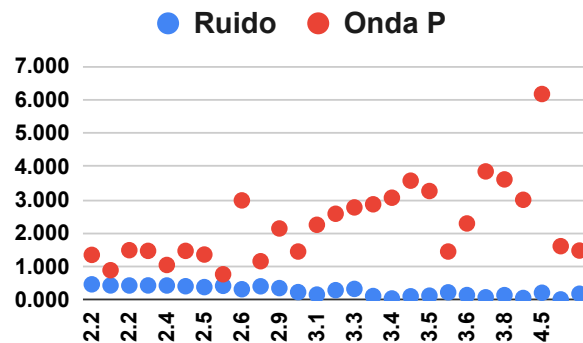
Figura 29.

Mapa de dispersión STA/LTA, antes de la llegada del arribo (Ruido) y después (Onda P)

(a) Canal N



(b) Canal Z



(c) Canal E

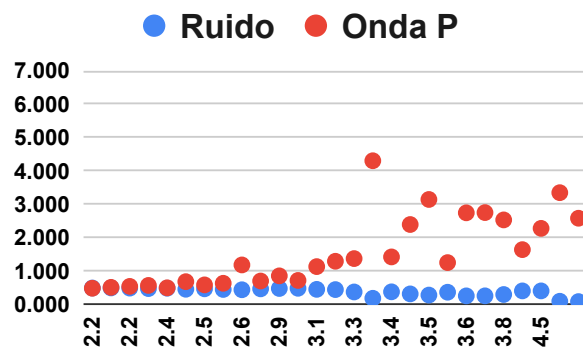


Tabla 3  
Resultados del algoritmo para adecuación de umbrales

Magnitud	STA/LTA (Antes del arribo)			STA/LTA (Durante la onda P)			Delta		
	HHN	HHZ	HHE	HHN	HHZ	HHE	HHN	HHZ	HHE
2.0	0.572	0.469	0.499	0.360	1.350	0.492	-0.212	0.881	-0.007
2.0	0.479	0.436	0.502	0.592	0.891	0.519	0.113	0.455	0.017
2.2	0.457	0.434	0.496	0.767	1.49	0.548	0.310	1.056	0.052
2.2	0.509	0.436	0.482	0.458	1.47	0.577	-0.051	1.034	0.095
2.2	0.387	0.434	0.493	1.06	1.048	0.505	0.673	0.614	0.012
2.3	0.527	0.412	0.462	0.395	1.47	0.689	-0.132	1.058	0.227
2.4	0.516	0.386	0.475	0.697	1.36	0.593	0.181	0.974	0.118
2.4	0.459	0.424	0.456	0.666	0.77	0.641	0.207	0.346	0.185
2.5	0.457	0.322	0.447	1.11	2.98	1.19	0.653	2.658	0.743
2.5	0.484	0.41	0.474	0.645	1.16	0.709	0.161	0.750	0.235
2.6	0.501	0.356	0.485	0.565	2.14	0.863	0.064	1.784	0.378
2.6	0.422	0.236	0.491	0.955	1.45	0.726	0.533	1.214	0.235
2.9	0.478	0.162	0.459	0.817	2.25	1.14	0.339	2.088	0.681
3.0	0.436	0.294	0.452	0.879	2.58	1.3	0.443	2.286	0.848
3.1	0.49	0.332	0.381	0.577	2.77	1.38	0.087	2.438	0.999
3.1	0.298	0.119	0.192	3.462	2.863	4.309	3.164	2.744	4.117
3.3	0.045	0.046	0.385	2.95	3.06	1.43	2.905	3.014	1.045
3.4	0.191	0.111	0.323	2.5	3.57	2.4	2.309	3.459	2.077
3.4	0.287	0.13	0.288	2.055	3.26	3.15	1.768	3.130	2.862
3.5	0.392	0.229	0.373	1.08	1.45	1.26	0.688	1.221	0.887
3.5	0.288	0.148	0.264	1.64	2.29	2.75	1.352	2.142	2.486
3.6	0.331	0.081	0.265	3.422	3.847	2.757	3.091	3.766	2.492
3.6	0.366	0.146	0.305	1.074	3.608	2.538	0.708	3.462	2.233
3.7	0.232	0.0605	0.413	2.774	2.998	1.648	2.542	2.938	1.235
3.8	0.448	0.217	0.413	1.329	6.162	2.285	0.881	5.945	1.872
4.2	0.082	0.018	0.103	3.069	1.61	3.353	2.987	1.592	3.250
4.5	0.097	0.188	0.093	2.337	1.479	2.588	2.240	1.291	2.495

Tabla 4  
*Resultados de detección*

STA/LTA				
Magnitud	HHN	HHZ	HHE	Estado
2	0.583	3.373	1.819	Activo
2	0.526	1.95	0.436	No Activo
2	0.687	0.911	0.382	No Activo
2.1	0.609	1.286	0.424	Activo
2.1	0.39	1.148	0.392	No Activo
2.1	0.649	0.91	0.509	No Activo
2.1	0.539	1.093	0.653	No Activo
2.2	0.496	0.734	0.601	No Activo
2.2	0.468	0.843	0.442	No Activo
2.3	0.696	1.719	0.578	Activo
2.3	0.394	0.835	0.553	No Activo
2.3	0.46	2.6	0.516	No Activo
2.7	0.652	1.54	0.473	Activo
2.7	0.44	1.63	0.45	No Activo
2.8	0.474	2.254	0.601	No Activo
2.8	0.337	1.359	0.901	Activo
2.9	1.545	3.784	0.522	Activo
3	0.601	3.85	0.476	Activo
3.2	3.6	7.55	1.972	Activo

#### 4.4. PCB y Ensamble Final

Una vez realizadas las validaciones tanto de la parte analógica, como de la parte digital se define la topología definitiva que se observa en la Figura 6 y se realiza el diseño de la PCB. Recibida la PCB fabricada se realiza el ensamblaje de los elementos como se puede ver en la Figura 30, para así proceder a hacer las diferentes pruebas, la Figura 31 muestra las señales de salida de dos de los canales ante perturbaciones locales.

Figura 30.  
Diseño y ensamblaje

(a) Diseño PCB del prototipo

(b) PCB ensamblada

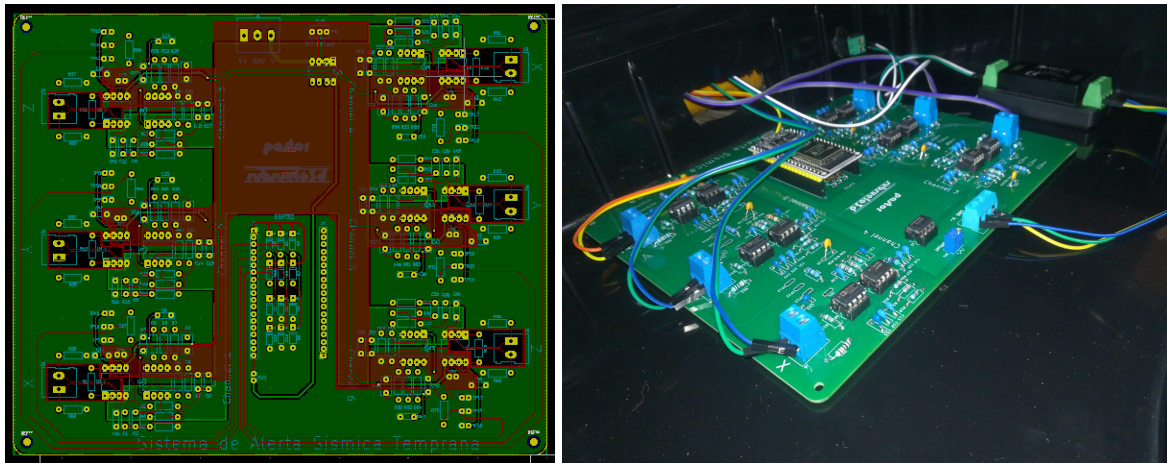
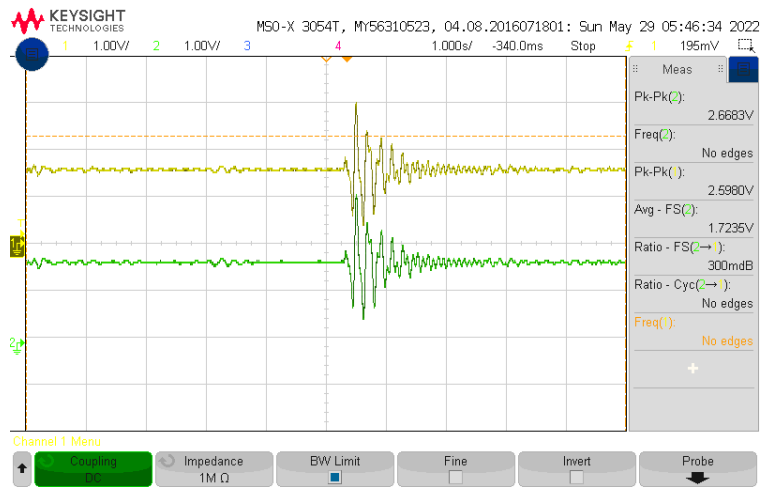


Figura 31.  
Señales captadas a la salida de la etapa analógica



## 5. Conclusiones

El rango de adquisición de señales óptimo para la etapa analógica es de 38.89mVpp a 200mVpp con un porcentaje de error en ganancia menos al 8% como se presenta en la Tabla 1 lo que se puede asociar por medio de la escala descrita en Earthquake Hazards (2016) a eventos sísmicos de intensidad mas leves en los rangos de velocidad pico de 0.165 cm/s a 1 cm/s.

El filtro Notch cumplió con las especificaciones dadas, obteniendo la mayor atenuación con -24.76db a 60Hz (Ver tabla 2) con ancho de banda aproximadamente de 98 Hz asociando un error del 8% al esperado. Respecto al ancho de banda final de la etapa analógica se presenta a los 139,02 Hz con un error asociando de 15.85% respecto al ancho de banda planteado.

Los efectos como interferencia y ruido a frecuencias mayores a 100Hz que se acoplan a la señal disminuyen la efectividad del algoritmo del 61.5% a 35.29% a magnitudes menores a 2.9 en escala Richter, esta información se evidencia de los resultados presentes en la Tabla 4.

La condición de activación del sistema se estableció con cierto grado de flexibilidad debido a los retrasos en cada uno de los canales del evento sismológico, puesto que, en los casos analizadas, el arribo (onda P) no llegaban en el mismo instante de tiempo para cada canal, la flexibilidad se estableció mediante la activación del sistema cuando 2 canales hicieren este registro y no los 3

consecutivamente, permitiendo así, mejorar la efectividad del algoritmo del 5.26 % al 42.1 %

## 6. Recomendaciones

Durante el desarrollo de este trabajo se identificaron puntos débiles del proyecto y se plantean cómo solventarlos. Partiendo de la revisión del desempeño del hardware instalado para la primera versión de las estaciones se detectaron las siguientes debilidades en el diseño.

Limitaciones de la etapa analógica y ADC interno: el diseño de la etapa analógica se limitó bajo los parámetros establecidos por la empresa subsuelo3d S.A.S., ya que estos requerimientos son insuficientes para capturar de forma óptima los valores de tensión que los geófonos brindan ante eventos de distintas magnitudes, la resolución de 12 Bits presente en el convertidor analógico-digital del microcontrolador ESP32 no es óptima para la detección completa de todo el sismo (Captura de la onda P y onda S), ya que posee una baja resolución comparado con lo recomendado por el servicio geológico colombiano que son 24 Bits, además de un rango de tensión de 40Vpp de señales diferencial (Servicio Geológico, 2021). A partir de esto el sistema tendría acceso a datos de mayor calidad para así garantizar mejora en el procesamiento, es por esto que se sugiere diseñar la etapa analógica bajo las especificaciones del servicio geológico colombiano.

Fallos en el algoritmo de detección: se puede complementar el algoritmo de detección con herramientas de procesamiento de datos sismológicos, como por ejemplo, modelos de aprendizaje profundo como por ejemplo detección de ondas P en tiempo real de forma de onda sísmica registrada en un acelerómetro MEMS de bajo coste (Khan y Kwon, 2022).

Falta de almacenamiento local: aunque el sistema actual cumple con los objetivos del planteados, no dispone de datos almacenados para un posterior análisis de los eventos capturados. Una siguiente fase del proyecto, según subsuelo3d S.A.S, se deberían implementar almacenamiento de los eventos, una posibilidad sería implementar medios externos como memoria USB ó memoria SD.

### Referencias Bibliográficas

Amazon, W. S. (2017). The freertos™ reference manual: Api functions and configuration options.

[https://freertos.org/Documentation/FreeRTOS\\_Reference\\_Manual\\_V10.0.0.pdf](https://freertos.org/Documentation/FreeRTOS_Reference_Manual_V10.0.0.pdf).

Analog Devices, C. (2011). Low cost low power instrumentation amplifier.

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>.

Ben-Menahem, A. & Singh, S. (2012). Seismic waves and sources: Springer science & business media. *New York*.

Earthquake Hazards, P. (2016). *Scientific Background. Rapid Instrumental Intensity Maps. Earthquake Hazards Program. U. S. Geological Survey.*

<https://www.usgs.gov/media/images/instrumental-intensity-shakemap>.

Espressif, S. (2021a). Esp32 series: Datasheet, specifications. url:

[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).

Espressif, S. (2021b). Esp32 series: Technical reference manual. url:

[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf).

Given, Douglas D and Allen, Richard M and Baltay, Annemarie S and Bodin, Paul and Cochran, Elizabeth S and Creager, Kenneth and de Groot, Robert M and Gee, Lind S and Hauksson, Egill and Heaton, Thomas H and others (2018). Revised technical implementation plan for the

shakealert system—an earthquake early warning system for the west coast of the united states. 1:102. <https://doi.org/10.3133/ofr20181155>.

Houliston, D., Waugh, G., & Laughlin, J. (1984). Automatic real-time event detection for seismic networks. *Computers & Geosciences*, 10(4):431–436.

Khan, I. & Kwon, Y.-W. (2022). P-detector: Real-time p-wave detection in a seismic waveform recorded on a low-cost mems accelerometer using deep learning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19:1–5.

McBride, SK Bostrom, A. S. & Others (2020). Developing post-alert messaging for shakealert, the earthquake early warning system for the west coast of the united states of america. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50:101713. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101713>.

Sepúlveda Jaimes, F. J. & Cabrera Zambrano, F. H. (2018). Tomografía sísmica 3d del nido sísmico de bucaramanga (colombia). *Boletín de Geología*, 40(2):15–33. DOI: 10.18273/revbol.v40n2-2018001.

Servicio Geologico, C. (2021). Especificaciones técnicas del monitoreo de sismicidad para el desarrollo de los proyectos piloto de investigación integral - ppii en yacimientos no convencionales - ync de hidrocarburos a través de la técnica de fracturamiento hidráulico multietapa con perforación horizontal - fh-ph. <https://www2.sgc.gov.co/Documents/Resolucion/Anexo%20tecnico%20monitoreo%20sismico.pdf>.

Servicio Geologico, C. (2022a). Servicio geológico colombiano: descarga de forma de onda.  
<https://sismo.sgc.gov.co:8080/fdsnws/dataselect/1/builder>.

Servicio Geologico, C. (2022b). Servicio geológico colombiano: sismos.  
<https://www.sgc.gov.co/sismos>.

Stein, S. & Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*.  
John Wiley & Sons.

Suárez, G. & Espinosa, A. (2018). A dedicated seismic early warning network: The mexican seismic alert system (sasmex). *Seismological Research Letters*, 89(2A):382–391.  
doi:10.1785/0220170184.

Technologies, G. (2021). Gs-one geophone: Datasheet. [https://www.geospace.com/wp-content/uploads/592-03270-01\\_F\\_Brochure-GS-ONE-Geophone-4p-for-desktop-printing.pdf](https://www.geospace.com/wp-content/uploads/592-03270-01_F_Brochure-GS-ONE-Geophone-4p-for-desktop-printing.pdf).

UNGRD (2021). Guía para el desarrollo de sistemas de alerta temprana sat. url:  
<https://online.pubhtml5.com/pxou/rhde/index.html>.

## Apéndice A

### Scripts y Archivos del Proyecto

El repositorio se encuentra estructurado por carpetas. La carpeta Scripts corresponde a la carpeta con los proyectos desarrollados para el funcionamiento del prototipo, este proyecto contiene las etapas mostradas en el documento que integran todas las funcionalidades y la validación del algoritmo solo cuenta con las funciones de detección. Adicionalmente, se encuentra el archivo *DescargaEventos.py*, el cual permite consultar la base de datos del SGC con los frentes de onda y descargar los datos sismológicos usados para el set de datos. La carpeta Eventos alberga el set de datos, están organizados en dos directorios uno de calibración que contiene 27 eventos que se usaron para definir los valores de los umbrales de detección y uno test que contiene 19 eventos que se usaron para probar el desempeño del algoritmo, estos directorios cuentan los datos en formato *.csv* y su correspondiente imagen sismológica, adicional, en un archivo *.txt* se guardan los resultados del algoritmo de detección del arribo de la onda P.

El repositorio se puede consultar en la siguiente URL:

*<https://github.com/RafaelLindarte/Tesis-Pastor.git>*