

Seismic Noise Analysis with Low-Cost Variable Gain Recorder

Iván Palacios, Sebastián Abril, Sebastián Placencia and Remigio Guevara

Abstract—This paper presents the design and implementation of a seismic noise analysis recorder. Specifically, the system has three main blocks. A configurable gain amplifier, a microcontroller for data acquisition and storage, and finally, both a GPS module and a real-time clock in order to ensure the time synchronization. With regard to the device management, a mobile application was implemented which provides users with tools to analyze data in real time as well to configure operational parameters (i.e., the sampling frequency, the gain of the amplifier and the recording start time). Regarding the architecture evaluation a set of experiments were designed in order to determine the intrinsic noise of the equipment and for verifying the proper operation on the continuous recording system. Finally, results were thoroughly analyzed in both temporal and the frequency domain with respect to data captured with a certified commercial equipment. The comparison carried out reveals a percentage error with a maximum of 7.68% and 3.40% for the time and frequency analysis, respectively. Consequently, the proposed system represents a reliable solution and low-cost alternative which contributes for the acquisition and analysis of seismic data.

Index Terms—microcontroller, seismic noise, seismic recorder, variable gain amplifier.

I. INTRODUCCIÓN

La adquisición de señales del movimiento del suelo es una tarea fundamental para el posterior desarrollo de sistemas enfocados en la detección de eventos sísmicos, el análisis de ruido sísmico ambiental y el desarrollo de estudios de microzonificación. En cuanto a los estudios de ruido ambiental, estos permiten determinar las fuentes de ruido sísmico ya sean naturales o artificiales [1]. Además, proporcionan información sobre la idoneidad de un sitio de emplazamiento para adquirir señales sísmicas, por lo que es imprescindible su desarrollo previo a la instalación de una estación [2].

Con el objetivo de adquirir estas señales, es necesario contar con un dispositivo sensor y un sistema de adquisición de datos. Mientras el sensor transforma la magnitud física de velocidad de movimiento o aceleración en un nivel equivalente de tensión eléctrica. Por otro lado, el equipo de adquisición de datos, el cual puede ser analógico o digital, es el encargado de leer y almacenar las señales sísmicas provenientes del sensor.

Se disponen de dos tipos de sensores para medir las señales sísmicas. El primero conocido como geófono, mide la velocidad del suelo y puede ser de una o tres componentes axiales. El segundo, es conocido como acelerómetro y mide la aceleración con la que se produce el movimiento. Las magnitudes de

las señales eléctricas generadas por estos sensores son del orden de los microvoltios hasta los milivoltios. En tal sentido, en el mercado existe gran variedad de este tipo de sensores cuyo costo difiere según las características de sensibilidad, resolución y ancho de banda.

Por otra parte, los equipos que adquieren las señales sísmicas son conocidos como digitalizadores. Entre los principales parámetros operativos de un digitalizador se encuentran la resolución del convertidor analógico a digital (ADC), el rango dinámico, la frecuencia de muestreo, la ganancia de amplificación y el ancho de banda. Un parámetro de particular interés es el valor de rango dinámico, el cual consiste en la relación entre la señal de mayor y la de menor amplitud que el sistema puede adquirir. En un digitalizador de señales sísmicas es necesario contar con un alto rango dinámico, en el orden de 120 dB, dada la amplitud de las señales proporcionadas por el sensor [2].

Las soluciones disponibles en el mercado usualmente son equipos de gran tamaño y peso, en el orden de 5 kg, y de un coste elevado, lo cual es un aspecto a considerar durante el desarrollo de estudios de campo y en especial cuando se requiere el emplazamiento de múltiples estaciones.

En tal contexto, en este artículo se presenta una solución para un sistema de adquisición de señales sísmicas. La arquitectura propuesta contempla el uso de tecnología reciente, de bajo coste y facilita el acceso a las tareas de configuración y análisis de datos a través de dispositivos externos del usuario, como ser un teléfono inteligente. El trabajo desarrollado destaca frente a sus similares por diseñar e implementar un sistema con todas las funcionalidades (ganancia variable, sincronización de tiempo, selección de parámetros y visualización de datos), presentar un análisis de costos y principalmente por realizar una validación completa de sus resultados versus un equipo certificado, tanto en análisis gráfico como analítico en el espacio temporal y frecuencial.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se resumen los trabajos relacionados. La Sección 3 analiza los métodos y materiales, donde se describen la metodología de diseño y el análisis de costos. En la Sección 4 se presenta el diseño detallado del sistema de adquisición de datos sísmicos. Los experimentos y los resultados se desarrollan en la Sección 5. Finalmente, en la Sección 6, se describen las principales conclusiones.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

El desarrollo de dispositivos digitalizadores es de especial interés en el ámbito de la instrumentación sísmica. En tal

Los autores forman parte de la Red Sísmica del Austro, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador (e-mail: ivan.palacios, sebastian.abril, jose.placencia, remigio.guevara@ucuenca.edu.ec).

los componentes ni presenta sincronización de tiempo. Por último, en cuanto a la validación de resultados empleando un equipo certificado, la mayoría de trabajos únicamente realizan un análisis gráfico. En este sentido, en [5] se realiza un análisis del error temporal entre los valores RMS (*Root Mean Square*), el cual se obtiene con un registro de 5 segundos y un evento con valores aproximados entre ± 600 mV. Sin embargo, no determina un error en el dominio de la frecuencia y el sistema no permite modificar su ganancia ni dispone de sincronización de tiempo.

III. MÉTODOS Y MATERIALES

En esta sección se presenta la metodología de diseño empleada, una descripción general del sistema de adquisición de datos sísmicos y un análisis de costos de los componentes del digitalizador.

A. Metodología de Diseño del Sistema

El diseño del sistema implementado se basa en la metodología *top-down*, la misma consiste en la división del sistema en subsistemas o tareas más simples de implementar. En la Fig. 1 se indica un diagrama de bloques con la metodología de diseño empleada, la misma consta de cuatro fases principales.

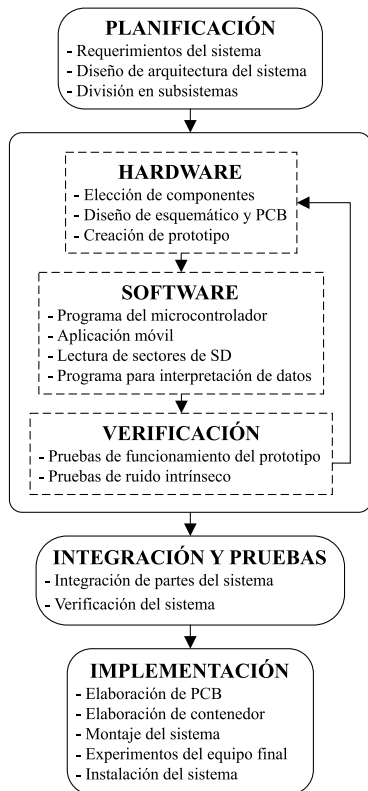


Fig. 1. Metodología de diseño del sistema.

La primera fase consiste en la planificación, donde se definen los requerimientos del digitalizador, la arquitectura del sistema y la división del sistema en subsistemas. En tal contexto, el sistema se dividió en dos subsistemas principales y estos en varias tareas. Por una parte, el subsistema de

acondicionamiento de la señal se divide en las tareas de amplificación, filtrado y *offset*. Por otro lado, el subsistema *datalogger* se divide en las tareas de adquisición, almacenamiento de datos, sincronización de tiempo y comunicación con el usuario.

La segunda fase consiste en un ciclo que desarrolla el *hardware* y *software* de cada uno de los subsistemas. Además, realiza pruebas de funcionamiento y la verificación del prototipo. Una vez validados todos los subsistemas, en la tercera fase, se realiza la integración de las partes y la verificación del equipo completo. Por último, en la cuarta fase se desarrolla la implementación del sistema final y su instalación en el sitio de emplazamiento.

Adicionalmente, el sistema implementado se basa en el microcontrolador (μ C) dsPIC30F4013 [20], el cual se eligió por las características de bajo coste, alta velocidad de operación (máximo 120 MHz) y disponibilidad de 13 canales analógicos de entrada. Además, posee un convertor analógico a digital de 12 bits (v.g. a diferencia de los 10 bits de un PIC) y rango de entrada entre 0 a +5 VDC. Por último, por su capacidad de memoria de programa que permite el manejo de la librería para la tarjeta micro SD y del *buffer* de datos para la adquisición (v.g. dispone del doble de memoria frente a su similar dsPIC30F3014). Dichas características permiten implementar un sistema escalable tanto en número de sensores como en términos de desarrollo de *software*.

B. Descripción del Sistema

Siguiendo la metodología indicada, se definieron tres bloques principales para la arquitectura del sistema, los mismos se esquematizan en la Fig. 2. El primer bloque corresponde al sensor sísmico, dicho sensor consiste en un geófono. La segunda etapa se encarga del acondicionamiento de las tres señales de entrada mediante los procesos de ajuste de amplificación, filtrado *anti-aliasing* y *offset*. En cuanto a la última etapa, esta consiste en un *datalogger*, basado en un microcontrolador, el cual es el encargado de ejecutar los procesos de adquisición de datos, la sincronización de tiempo, el almacenamiento de los datos sísmicos y la comunicación con el usuario.

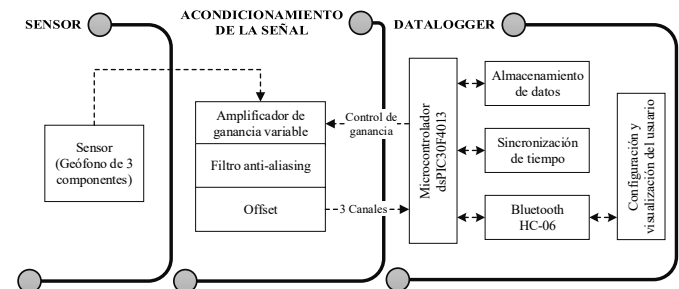


Fig. 2. Arquitectura general del digitalizador sísmico.

Además, el sistema cuenta con una aplicación desarrollada para dispositivos móviles, la misma permite ejecutar las tareas de configuración y la visualización de datos en tiempo real. Con respecto a los parámetros de configuración, es posible definir características operativas tales como la frecuencia de

muestreo, el tiempo de inicio y la ganancia de amplificación. Adicionalmente, se destaca la característica de portabilidad que facilita las tareas de instalación y desarrollo de experimentos en campo. El hardware implementado se presenta en la Fig. 3.

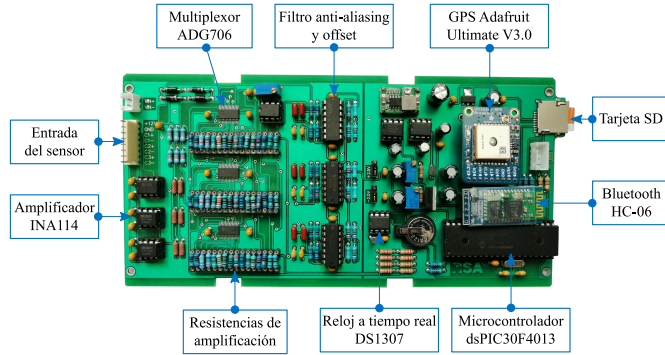


Fig. 3. Digitalizador implementado con sus componentes.

Para evaluar el sistema implementado, se diseñaron experimentos para analizar el ruido intrínseco del digitalizador y comparar su respuesta temporal y frecuencial versus un equipo comercial. Por una parte, para cotejar las amplitudes, se llevó a cabo un análisis tanto de la velocidad del suelo respecto al tiempo como de la densidad espectral de potencia (PSD), dicho análisis se realizó de forma gráfica y analítica con el error porcentual entre valores RMS y el error porcentual cuadrático medio, RMSPE (*Root Mean Square Percentage Error*). Por otro lado, para el estudio de ruido sísmico, se realizó un análisis de la densidad espectral de potencia probabilística (PPSD) tanto gráfica como analíticamente.

C. Análisis de Costos

Con el objetivo de desarrollar un equipo de bajo coste, el *hardware* del sistema se caracteriza por el uso de circuitos

integrados y componentes electrónicos simples. En la tabla II se presentan los componentes empleados en el equipo y su precio, los cuales generan un costo aproximado del sistema de 250 USD. Por consiguiente, el digitalizador implementado tiene un coste muy inferior al de un equipo comercial (v.g. el digitalizador Obsidian 4X, utilizado para comparar los resultados, tiene un precio aproximado de 40 veces respecto al sistema desarrollado).

IV. DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA

En esta sección se detalla cada uno de los bloques del sistema implementado y la etapa de post procesamiento de los datos sísmicos.

A. Sensor Sísmico

El primer bloque del sistema es el sensor sísmico. En este sentido, se diseñó un equipo que permite como entrada tanto un único geófono de tres componentes como, de forma alternativa, entre uno y tres geófonos de un canal. Para los experimentos se emplearon geófonos de tres componentes, específicamente los sensores LE-3Dlite y LE-3Dlite modelo MkIII [21], los mismos disponen de una frecuencia natural de 1 Hz y una sensibilidad de 400 V/m/s y 800 V/m/s respectivamente.

En la Fig. 4 se presentan las gráficas de ruido intrínseco de los dos geófonos, acorde a las especificaciones técnicas detalladas en [21]. Dichas curvas proporcionan información del ruido mínimo que puede medir cada geófono. Como se puede observar, el sensor LE-3Dlite MkIII permite detectar señales sísmicas de menor magnitud que el LE-3Dlite, con una diferencia en el orden de 5 dB. Además, se comparan con los modelos de ruido bajo y alto de Peterson (NHNM y NLNM). De las gráficas se infiere que ambos sensores permiten realizar el análisis de ruido sísmico para frecuencias mayores a 0.1 Hz, en las cuales su nivel de ruido se encuentra entre las dos curvas del modelo y cercano al nivel inferior, como se resalta en [17].

TABLA II
COMPONENTES DEL DIGITALIZADOR Y SU COSTO

Cantidad	Descripción componente	Proveedor	Precio	
			Unitario (USD)	Total (USD)
1	Microcontrolador dsPIC30F4013 I/P	Mouser Electronics	5.91	5.91
2	Regulador de tensión negativo ICL7662CPA+	Mouser Electronics	4.97	9.94
3	Amplificador INA114AP	Mouser Electronics	11.57	34.71
3	Multiplexor ADG706B	Mouser Electronics	6.71	20.13
3	Amplificador TL084	Mouser Electronics	0.59	1.77
1	Amplificador TL082	Mouser Electronics	0.77	0.77
1	RTC DS1307	Mouser Electronics	3.93	3.93
1	Módulo Adafruit GPS Ultimate	Adafruit	39.95	39.95
1	Antena externa para GPS de 5m	Adafruit	14.95	14.95
1	Módulo Bluetooth HC-06	Amazon	8.49	8.49
1	Tarjeta micro SD 8GB	Amazon	6.00	6.00
1	Carcasa	-	30.00	30.00
1	Tarjeta PCB a doble lado, incluye soldadura	-	40.00	40.00
1	Componentes varios (resistencias, capacitores, conectores, peinetas, cristales, diodos, reguladores)	-	30.00	30.00
			Costo Total	246.55

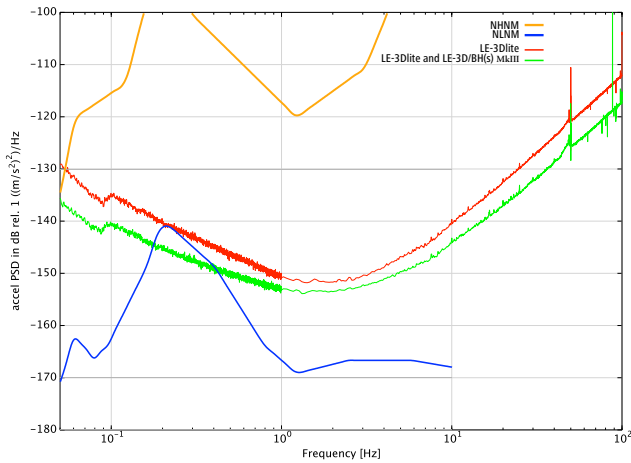


Fig. 4. Ruido interno de los geófonos LE-3Dlite y LE-3Dlite MkIII comparado con los modelos de ruido de Peterson. Cortesía de Dr. Rudolf Widmer-Schmidrig, BFO (Black Forest Observatory).

B. Acondicionamiento de la Señal

La segunda etapa corresponde al acondicionamiento de las señales de entrada del geófono. El diagrama detallado de esta etapa para cada canal se presenta en la Fig. 5, donde se indican tres bloques principales. En primer lugar, una etapa de amplificación con ganancia configurable. A continuación, un filtro *anti-aliasing* y finalmente un generador de *offset*.

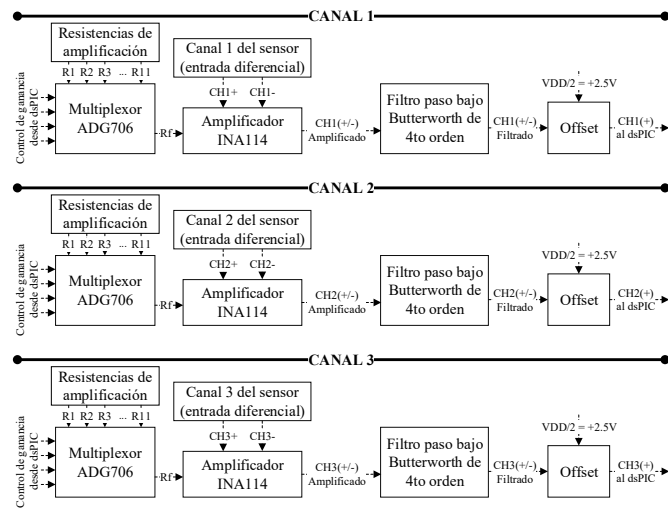


Fig. 5. Diagrama de bloques de la etapa de acondicionamiento de la señal.

Con respecto a la amplificación, se utilizó el circuito integrado amplificador INA114 [22], de entrada diferencial, ganancia de amplificación variable y bajo ruido. Cabe indicar que dicho elemento permite modificar la ganancia de amplificación a través de un resistor variable. Con tal finalidad, se incorporó un multiplexor ADG706 [23] y 11 resistores de distinto valor. Por lo tanto, se dispone de 11 niveles de amplificación desde 6 dB hasta 66 dB. En cuanto a la configuración del valor de amplificación, dicho parámetro se elige en la aplicación móvil y, a continuación, se envía al microcontrolador. Finalmente, el μC se encarga de modificar

los códigos de entrada al multiplexor para seleccionar el resistor correspondiente.

El segundo bloque de acondicionamiento corresponde al filtro *anti-aliasing*. El objetivo de este filtro es eliminar las frecuencias altas no deseadas [24]. En particular, se implementó un filtro *anti-aliasing* analógico para cada canal de tipo Butterworth Sallen Key pasa bajas de cuarto orden y frecuencia de corte de 80 Hz.

Finalmente, en la etapa de acondicionamiento se realiza un ajuste de *offset* de la señal. Para ello se agrega un voltaje mediante un amplificador sumador y se eliminan los valores negativos de cada canal. Esta etapa se requiere debido a que el ADC del microcontrolador no admite señales negativas. Una vez realizado este procedimiento, la señal positiva resultante pasa al ADC.

C. Datalogger Basado en el Microcontrolador dsPIC30F4013

La última etapa del sistema digitalizador corresponde a un *datalogger* basado en el microcontrolador dsPIC30F4013 y su diagrama funcional se presenta en la Fig. 6. Como se puede observar, el *datalogger* se encarga de las tareas de adquisición y almacenamiento de los datos, la sincronización de tiempo y la configuración de los parámetros del digitalizador.

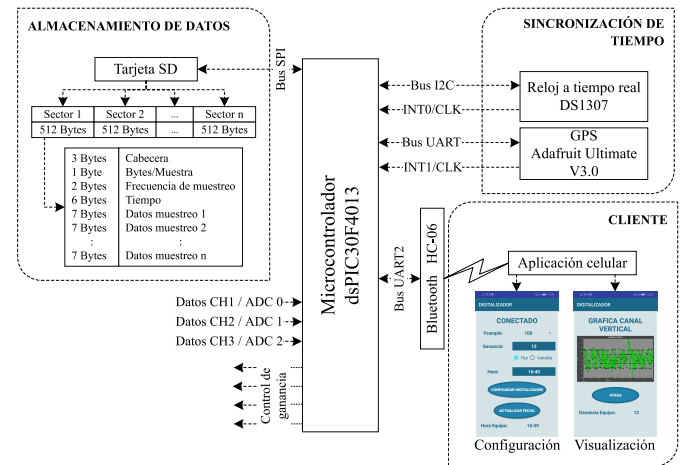


Fig. 6. Diagrama de bloques del datalogger.

En referencia al sistema de adquisición de datos, para cada uno de los canales se utilizó el convertidor analógico a digital disponible en el μC . El mismo tiene 12 bits de resolución y permite una señal de entrada en el rango de 0 a +5 VDC. Por esta razón, el rango dinámico resultante es de 72 dB, con el cual no es posible la adquisición de ruido sísmico para valores en el rango de micro voltios.

Por consiguiente, con el objetivo de adquirir dichas señales, se diseñó e implementó una etapa de ganancia configurable que amplifica las señales sísmicas dentro del rango de lectura del ADC. Sin embargo, cabe indicar que el incremento de la amplificación implica un cambio del rango dinámico. Dicho cambio ocurre dado que disminuye el valor de mayor amplitud que puede ser adquirido antes de la saturación del ADC. Por estos motivos, el sistema implementado permite el análisis de ruido sísmico donde se descartan los eventos fuertes (v.g. para

la mayor ganancia de 66 dB la amplitud máxima que puede adquirir el sistema es de ± 1.25 mV).

Con respecto al almacenamiento de datos, se utilizó una tarjeta micro SD en formato FAT32. En tal contexto, el microcontrolador almacena los datos directamente en los sectores de la SD, de esta forma se evita la creación de archivos, dotando al sistema de mayor confiabilidad y seguridad para los datos. En la Fig. 6 se presenta el formato correspondiente para los datos almacenados en cada sector. Como se puede observar, la estructura está conformada por una cabecera, la marca de tiempo y la información por muestra. En particular, para cada muestra se almacena un *byte* de la ganancia del amplificador y dos *bytes* por cada canal. La trama de datos se almacena cada segundo, ya sea, con el pulso de interrupción del GPS o mediante el reloj a tiempo real. Por lo tanto, se evita la pérdida de datos en caso de fallos de energía o desconexión del equipo.

Cabe resaltar que para lograr una adecuada sincronización, el μ C debe generar un tiempo de muestreo preciso para la adquisición de los datos de los tres canales. Con tal objetivo, se empleó un dispositivo GPS Adafruit Ultimate v3.0 [25], el mismo proporciona una referencia de tiempo real y genera una interrupción cada segundo. Dicha interrupción se utiliza para reiniciar el temporizador del microcontrolador, lo cual garantiza la precisión en el tiempo de muestreo. Finalmente, se incorporó un reloj a tiempo real DS1307 [26] que referencia el reloj cuando el GPS no funciona. De tal manera, el sistema garantiza la sincronización de tiempo.

El último bloque del *datalogger* corresponde a la interacción con el usuario. Para ello, se implementó una aplicación para dispositivos de usuarios con sistema operativo Android (v.g. *smartphones*). La aplicación se enlaza con el sistema de adquisición mediante una conexión *bluetooth*. Además, permite configurar los parámetros del digitalizador y visualizar los datos en tiempo real, como se presenta en el bloque correspondiente de la Fig. 6.

En lo referente a la configuración del digitalizador, es posible establecer tres parámetros. En primer lugar, la frecuencia de muestreo que puede ser de 100 o de 200 Hz. El segundo parámetro es la ganancia de amplificación y finalmente el tiempo de inicio para la adquisición de los datos. Por otro lado, respecto a la visualización, la aplicación móvil presenta una gráfica de los datos en tiempo real, la cual corresponde a las muestras diezmasdas del primer canal.

D. Post Procesamiento de los Datos Sísmicos

Los datos sísmicos del digitalizador se almacenan en los sectores de la micro SD. Por tal motivo, no se crea archivos y no es posible visualizar los datos con un editor de texto. Con tal finalidad, se implementó un programa, desarrollado en el lenguaje Python [27], para leer los *bytes* de cada sector de la SD. El mismo realiza la lectura de los datos de los tres canales, la ganancia y el tiempo. Además, almacena esta información en un archivo en formato miniSEED, versión reducida de SEED (*Standard for the Exchange of Earthquake Data*) [28]. Dicho formato es un estándar muy adecuado para el almacenamiento y procesamiento de información sísmica.

Finalmente, para visualizar los datos se utilizó la librería ObsPy [29], la cual es de tipo *open source*, desarrollada en el lenguaje Python y con funcionalidades específicas para sismología.

V. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los experimentos realizados y sus resultados. En este sentido, se realizaron dos pruebas. La primera consiste en el análisis de ruido intrínseco del sistema. Mientras que la segunda se enfoca en la comparación del sistema implementado versus el equipo comercial disponible, dicho equipo es el digitalizador Obsidian 4X [30] de Kinematics.

A. Análisis del Ruido Interno

En este experimento se determinó el ruido intrínseco del sistema desarrollado. Para tal efecto, se conectó la entrada diferencial positiva con la negativa de cada canal y se adquirieron los datos. En el caso ideal la tensión obtenida debe ser igual a 0 V. Además, se configuró la frecuencia de muestreo en 100 Hz.

Considerando que la magnitud del ruido interno del sistema se determina con el valor cuadrático medio (RMS), se requirió configurar la máxima ganancia de amplificación, de esta forma es posible determinar el menor nivel de ruido sísmico posible de registrar, que se encuentra en el orden de 5μ V. Además, se utilizaron las muestras de una hora de adquisición, las cuales generaron los siguientes resultados de ruido RMS, 4.3μ V, 3.6μ V y 3.4μ V para los canales 1, 2 y 3 respectivamente. Por consiguiente, con tal nivel de ruido intrínseco, es factible la medición de señales sísmicas. En la Fig. 7 se presentan las gráficas de ruido de los tres canales, durante un intervalo de análisis de 15 segundos, donde se puede observar que los datos se encuentran en el rango de los micro voltios.

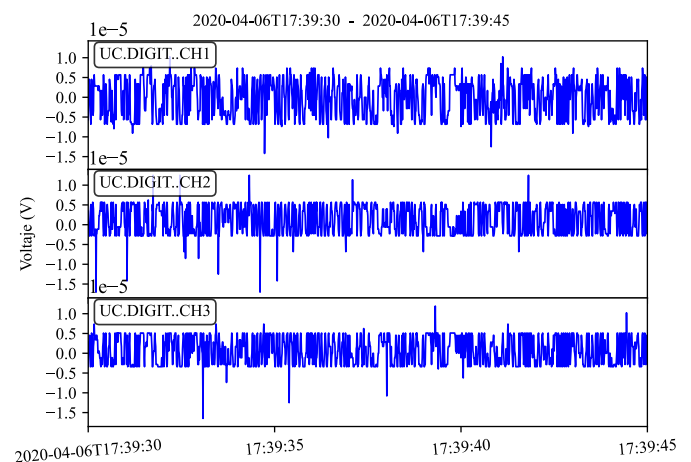


Fig. 7. Experimento de ruido intrínseco del sistema.

B. Comparación con Equipo Comercial

Con el objetivo de validar los datos adquiridos por el digitalizador implementado, se realizó una comparación versus el

equipo comercial Obsidian 4X. Los dos sistemas se colocaron en el mismo sitio, uno al lado del otro, y se obtuvo un registro continuo de datos. Las características de los dos sistemas y los parámetros configurados se indican en la Tabla III.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS CONFIGURADOS EN LOS DIGITALIZADORES

	Digitalizador Implementado	Obsidian 4X
Resolución ADC	12 bits	24 bits
Rango dinámico	72 dB	130 dB
Ganancia de amplificación	48 dB	0 dB
Frecuencia de muestreo	100 Hz	100 Hz
Costo aproximado	250 USD	10000 USD
Peso	0.4 kg	5 kg
Dimensiones	210x110x40 mm	355x140x173 mm

La instalación de los dos sistemas, en el sitio de emplazamiento, se realizó siguiendo las especificaciones de las hojas características de los sensores [21] y los protocolos mencionados en [2]. En particular, se eligió un sitio en el campo que dispone de una estructura cubierta y con acceso a energía eléctrica para facilitar las conexiones y experimentos. Además, posee una superficie de concreto para la instalación de los sensores. Por último, en lo referente a los geófonos, se ajustó su orientación en la dirección norte y se realizó la adecuada nivelación respecto al suelo. En la Fig. 8 se presenta una foto del sistema instalado junto al equipo comercial.

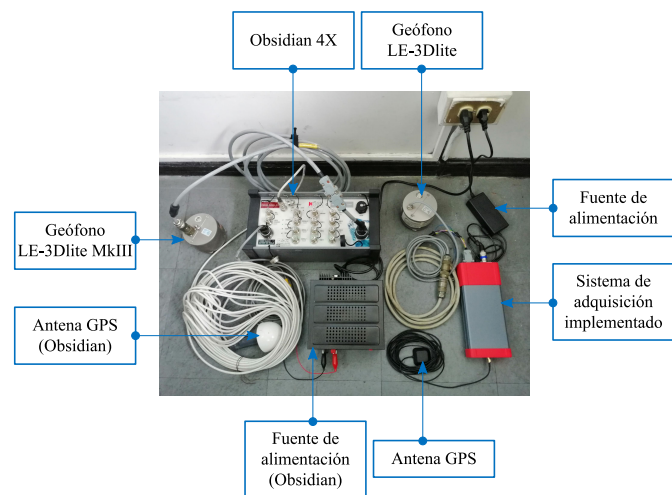


Fig. 8. Experimento del sistema implementado y del equipo comercial Obsidian 4X.

La primera parte de este experimento consiste en la comparación de la amplitud de las señales de los dos equipos. Para cumplir tal objetivo, y debido a la disponibilidad de dos sensores con distinta sensibilidad, se realizaron dos registros de datos.

En el primero, se colocó el sensor LE-3Dlite MkIII con el digitalizador implementado y el sensor LE-3Dlite con el equipo comercial. En las figuras 9a, 9b y 9c se muestra un registro de datos de los dos sistemas para los canales 1, 2 y

3 respectivamente, dichos registros son de 20 minutos. Adicionalmente, con el objetivo de realizar un análisis frecuencial, la densidad espectral de potencia de las dos señales y su desviación se grafican en las figuras 9d, 9e y 9f para los canales 1, 2 y 3.

Como se puede observar, en el espacio temporal, en los dos registros de los canales 1 y 3 los valores oscilan en el rango de $\pm 4.5 \mu\text{m/s}$. Por otro lado, en los dos registros del canal 2 los valores se encuentran entre $\pm 7 \mu\text{m/s}$. En cuanto al dominio frecuencial, los 3 canales presentan una desviación máxima de $\pm 2 \text{ dB}$, entre las dos curvas, en el rango de frecuencias entre 2 y 24 Hz. Por otra parte, en el canal 1 existen diferencias considerables para frecuencias mayores a 32 Hz, en el canal 2 para frecuencias superiores a 26 Hz y en el canal 3 a partir de 24 Hz.

Los resultados obtenidos en el primer experimento se indican en la Tabla IV. Como se puede observar, los errores porcentuales entre los valores RMS de los dos equipos son 7.01%, 5.93% y 4.65% para los canales 1, 2 y 3 respectivamente. Además, el error porcentual cuadrático medio, RMSPE, entre las señales de la densidad espectral de potencia es de 0.99%, 3.03% y 2.94% para los canales 1, 2 y 3 respectivamente.

TABLA IV
RESULTADOS DEL PRIMER EXPERIMENTO

Experimento 1				
Sensor Digitalizador	LE-3Dlite MkIII	CH1	CH2	CH3
Sensor Obsidian	LE-3Dlite	CH1	CH2	CH3
// Gráficas		Fig. 9a, 9d	Fig. 9b, 9e	Fig. 9c, 9f
Valor RMS DIGIT		3.609e-7 m/s	4.554e-7 m/s	4.450e-7 m/s
Valor RMS OBSID		3.881e-7 m/s	4.299e-7 m/s	4.667e-7 m/s
Error RMS		7.01%	5.93%	4.65%
RMSPE PSD		0.99%	3.03%	2.94%

Para la segunda prueba se intercambiaron los sensores. En las figuras 10a, 10b y 10c se presentan las gráficas de velocidad vs tiempo y en las figuras 10d, 10e y 10f la densidad espectral de potencia y su desviación. En este experimento, los datos de velocidad del registro se encuentran en el rango de $\pm 18 \mu\text{m/s}$, $\pm 35 \mu\text{m/s}$ y $\pm 20 \mu\text{m/s}$ para los canales 1, 2 y 3 respectivamente. Por otra parte, en el espacio frecuencial el comportamiento es similar al primer experimento, en el rango de frecuencias entre 2 y 24 Hz la desviación es inferior a $\pm 2 \text{ dB}$ y para frecuencias mayores existen diferencias considerables.

Los resultados obtenidos en el segundo experimento se presentan en la Tabla V. En este caso, los errores porcentuales entre los valores RMS de los dos equipos son 6.37%, 7.68% y 5.68% mientras los errores RMSPE entre las señales PSD son 1.21%, 2.94% y 1.83% para los canales 1, 2 y 3 respectivamente. Si se compara con la tabla IV, en cuanto al análisis temporal se infiere que los errores porcentuales entre valores RMS se encuentran entre 4.65% y 7.68%. Además, en los dos experimentos el canal 3 presenta menor error. Con respecto

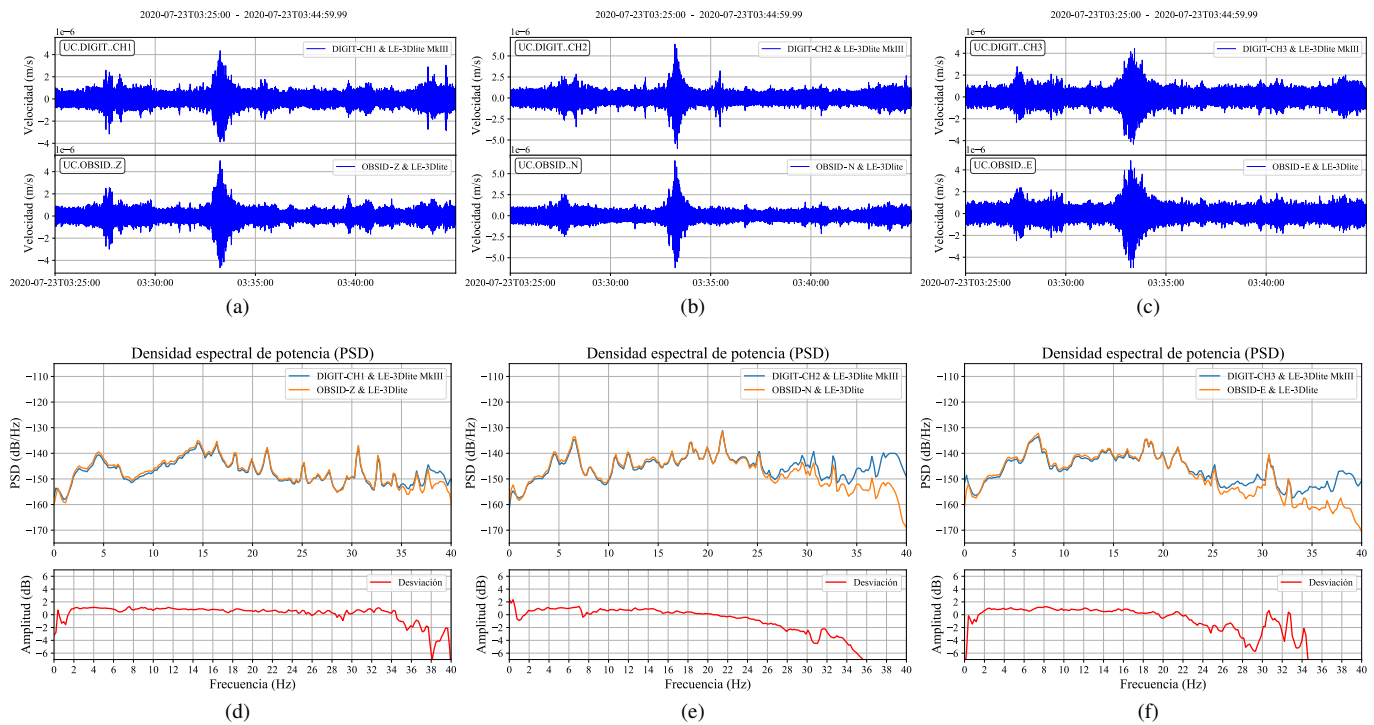


Fig. 9. Registro de datos de los dos sistemas en el primer experimento. Gráficas de velocidad vs tiempo del canal 1 (a) canal 2 (b) y canal 3 (c). Densidad espectral de potencia y su desviación para el canal 1 (d) canal 2 (e) y canal 3 (f).

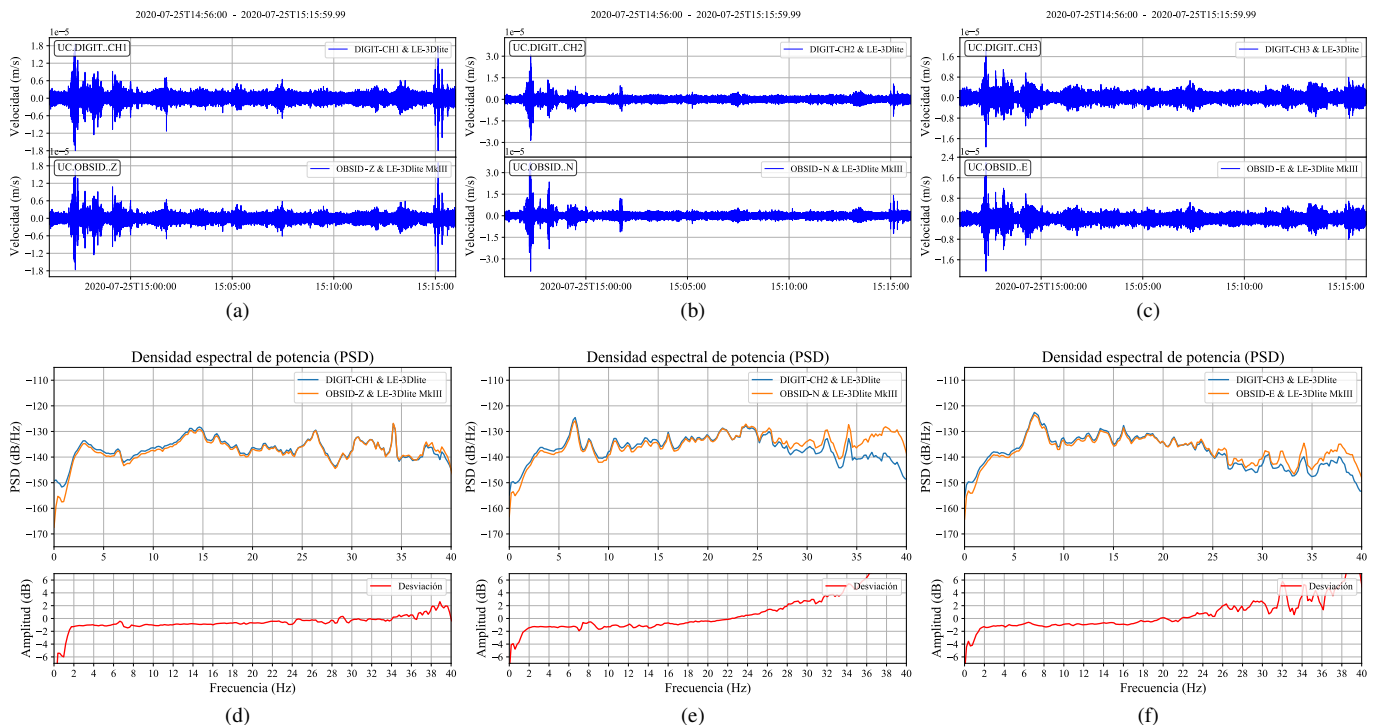


Fig. 10. Registro de datos de los dos sistemas en el segundo experimento. Gráficas de velocidad vs tiempo del canal 1 (a) canal 2 (b) y canal 3 (c). Densidad espectral de potencia y su desviación para el canal 1 (d) canal 2 (e) y canal 3 (f).

a la respuesta frecuencial, se observa un error entre 0.99% y 3.03%. En este caso, el canal 1 muestra menor error en ambos experimentos. Finalmente, el tercer experimento corresponde al análisis de

ruido sísmico. En este contexto, se estimó la densidad espectral de potencia probabilística y se incluyó la función de transferencia del geófono LE-3Dlite [21]. Para tal efecto, se utilizó la funcionalidad PPSD disponible en la librería Obspy [31].

TABLA V
RESULTADOS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO

Experimento 2			
Sensor Digitalizador	LE-3Dlite		
Sensor Obsidian	LE-3Dlite MkIII		
	CH1	CH2	CH3
Gráficas	Fig. 10a, 10d	Fig. 10b, 10e	Fig. 10c, 10f
Valor RMS DIGIT	1.086e-6 m/s	1.274e-6 m/s	1.283e-6 m/s
Valor RMS OBSID	1.021e-6 m/s	1.380e-6 m/s	1.214e-6 m/s
Error RMS	6.37%	7.68%	5.68%
RMSPE PSD	1.21%	2.94%	1.83%

Dicha función se basa en la rutina desarrollada por McNamara, como se describe en [32], adicionalmente incluye las curvas de nivel de ruido bajo y alto de Peterson.

Las gráficas de la PPSD con las muestras de los tres canales de los dos equipos se presentan en la figura 11. Para dichos resultados, se utilizaron los datos de un día y medio de registro

continuo. Además, el sistema implementado empleó el sensor LE-3Dlite MkIII y el digitalizador Obsidian el LE-3Dlite.

Como se puede observar, para el sitio de emplazamiento seleccionado, las seis curvas presentadas se encuentran entre los dos niveles de ruido de Peterson para periodos inferiores a 8 segundos. Lo cual indica que es posible la instalación de una estación sísmica en este lugar. Para tal análisis se descartaron los datos de periodos superiores a 10 segundos debido al ruido intrínseco de los sensores (como se indicó en la sub sección de sensor sísmico). Si se desea un análisis del total de periodos, es necesario emplear sensores de menor frecuencia natural.

Con el objetivo de realizar una comparación entre los dos sistemas, se calculó la media de las densidades espectrales de potencia para cada registro de datos. En las figuras 11g, 11h y 11i se muestran las curvas correspondientes a la media de cada registro y la desviación entre ellas, para los canales 1, 2 y 3 respectivamente. En estas figuras se observa que las dos curvas tienen un comportamiento similar en el rango de periodos entre 0.04 y 4 segundos, donde la desviación se encuentra en el orden de +/- 2 dB. En cuanto a las diferencias existentes en los periodos restantes, dicho comportamiento

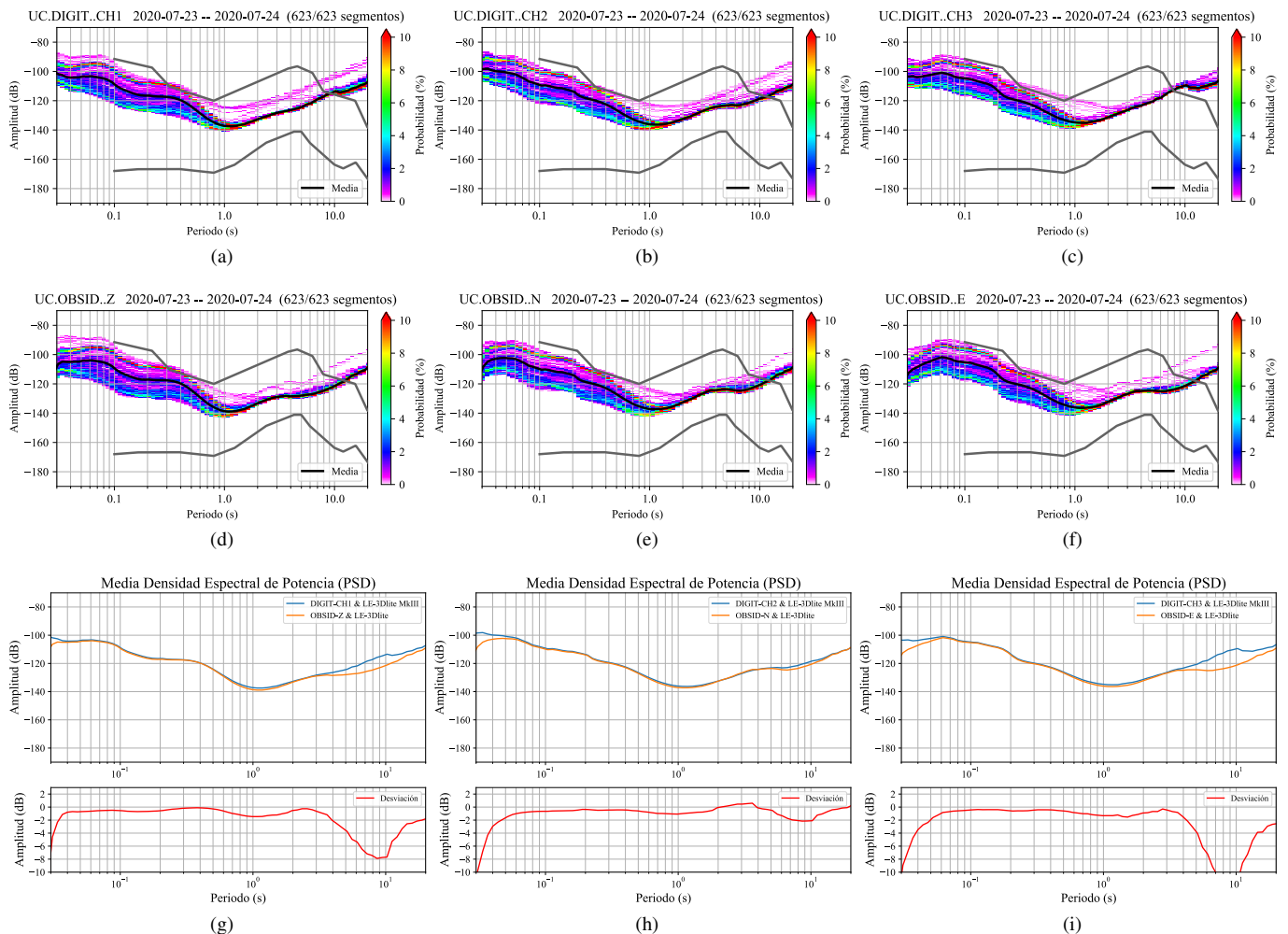


Fig. 11. Densidad espectral de potencia probabilística. Canal 1 (a) canal 2 (b) y canal 3 (c) del digitalizador implementado y sensor LE-3Dlite MkIII. Canal 1 (d) canal 2 (e) y canal 3 (f) del equipo Obsidian 4X y sensor LE-3Dlite. Media de las densidades espectrales de potencia y su desviación para el canal 1 (g) canal 2 (h) y canal 3 (i).

se debe principalmente a la frecuencia natural de 1 Hz de los geófonos y a las características del equipo disponible empleado a efectos de comparación (v.g. sensibilidad, ruido intrínseco de los sensores).

Por último, los resultados de error porcentual cuadrático medio (RMSPE) entre las curvas de las figuras 11g, 11h y 11i se presentan en la tabla VI. Los errores obtenidos son de 2.22%, 1.61% y 3.40% para los canales 1, 2 y 3 respectivamente.

TABLA VI
RESULTADOS DEL TERCER EXPERIMENTO

Experimento 3			
Sensor Digitalizador	LE-3Dlite MkIII		
Sensor Obsidian	LE-3Dlite		
	CH1	CH2	CH3
Gráfica	Fig. 11g	Fig. 11h	Fig. 11i
RMSPE PSD	2.22%	1.61%	3.40%

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño e implementación de un digitalizador de tres componentes, ganancia variable y bajo coste para aplicaciones de ruido sísmico. Específicamente, se empleó un amplificador de ganancia configurable y un microcontrolador para la adquisición y almacenamiento de datos sísmicos. Dichos elementos permiten incrementar el rango dinámico (72 dB del ADC y hasta 66 dB de amplificación) y la adquisición de señales sísmicas en el orden de μV .

Los experimentos permitieron evaluar el desempeño del equipo desarrollado, para lo cual se calculó el ruido intrínseco del sistema y el valor RMS obtenido es inferior a $5 \mu\text{V}$ con la máxima amplificación.

Se realizó la comparación del sistema implementado versus un equipo comercial. En estos experimentos, en el espacio temporal, se obtuvo un error porcentual máximo entre los valores RMS de 7.68%. Además, se estimó la PPSD para análisis de ruido sísmico, como resultado se obtuvo un error RMSPE máximo de 3.40% entre las medias de las densidades espectrales de potencia generadas con los registros de los dos equipos.

Los resultados mostraron que el digitalizador desarrollado logra registrar de manera satisfactoria mediciones de señales sísmicas para un análisis simple de tales eventos, mediante el uso de un equipo portable, configurable y de bajo coste.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen profundamente al Departamento Red Sísmica del Austro (RSA) y a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC), por todo el apoyo y facilidades brindadas para el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] A. Trnkoczy, P. Bormann, W. Hanka, L. G. Holcomb, R. L. Nigbor, M. Shinohara, H. Shiobara, and K. Suyehiro, *New manual of seismological observatory practice*, 2nd ed. GFZ German Research Center for Geosciences, 2012, ch. 7.
- [2] J. Havskov and G. Alguacil, *Instrumentation in Earthquake Seismology*, 2nd ed. Springer International Publishing, 2015.
- [3] A. Saraò, M. Clocchiatti, C. Barnaba, and D. Zuliani, "Using an Arduino Seismograph to Raise Awareness of Earthquake Hazard Through a Multidisciplinary Approach," *Seismological Research Letters*, vol. 87, no. 1, pp. 186–192, Jan 2016. [Online]. Available: <https://pubs.geoscienceworld.org/srl/article/87/1/186-192/315662>
- [4] O. Kafadar and I. Sertcelik, "A Computer-Aided Data Acquisition System for Multichannel Seismic Monitoring and Recording," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 18, pp. 6866–6873, 2016.
- [5] L. R. Daryono, A. Rahmadi, I. Suyanto, and W. Suryanto, "Design and implementation of seismic data acquisition system using PC/104," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 10, Oct 2019. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s42452-019-1038-7>
- [6] M. Li, Z. Yuan, and C. Jiang, "Design of seismic data acquisition system," *International Conference on Signal Processing Proceedings, ICSP*, pp. 2580–2583, 2010.
- [7] J. Morales Valdez, L. Alvarez-Icaza, and J. A. Escobar, "Online Identification System for Damage Location in Building Structures," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 08, pp. 1283–1290, aug 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8932337/>
- [8] K. Dai, X. Li, C. Lu, Q. You, Z. Huang, and H. F. Wu, "A low-cost energy-efficient cableless geophone unit for passive surface wave surveys," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, pp. 24698–24715, 2015.
- [9] P. Gao, Z. Li, F. Li, H. Li, Z. Yang, and W. Zhou, "Design of Distributed Three Component Seismic Data Acquisition System Based on LoRa Wireless Communication Technology," in *Chinese Control Conference, CCC*, vol. 2018-July. Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation, 2018, pp. 10285–10288.
- [10] R. Tian, L. Wang, X. Zhou, H. Xu, J. Lin, and L. Zhang, "An integrated energy-efficient wireless sensor node for the microtremor survey method," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 3, 2019.
- [11] H. Attia, S. Gaya, A. Alamoudi, F. M. Alshehri, A. Al-Suhaimi, N. Alsulaim, A. M. Al Naser, M. Aghyad Jamal Eddin, A. M. Alqahtani, J. Prieto Rojas, S. Al-Dharrab, and F. Al-Dirini, "Wireless geophone sensing system for real-time seismic data acquisition," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 81116–81128, 2020.
- [12] S. Qiao, Q. Zhang, Q. Zhang, F. Guo, and W. Li, "Hybrid Seismic-Electrical Data Acquisition Station Based on Cloud Technology and Green IoT," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 31026–31033, 2020.
- [13] J. Soler-Llorens, J. Galiana-Merino, J. Giner-Caturla, P. Jauregui-Eslava, S. Rosa-Cintas, and J. Rosa-Herranz, "Development and programming of Geophonino: A low cost Arduino-based seismic recorder for vertical geophones," *Computers & Geosciences*, vol. 94, pp. 1–10, Sep 2016. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300416301364>
- [14] J. L. Soler-Llorens, J. J. Galiana-Merino, B. Y. Nassim-Benabdeloued, S. Rosa-Cintas, J. O. Zamora, and J. J. Giner-Caturla, "Design and implementation of an arduino-based plug-and-play acquisition system for seismic noise measurements," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 9, 2019.
- [15] I. V. Matveev and N. V. Matveeva, "SEISAR-5 Portable Seismic Recorder with Low Energy Consumption for Autonomous Operation in Harsh Climatic Conditions," *Seismic Instruments*, vol. 54, no. 6, pp. 626–630, Dec 2018. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.3103/S0747923918060087>
- [16] P. G. Butyrin, F. G. Verkholtantsev, A. V. Verkholtantsev, and D. Y. Shulakov, "Digital Seismic Logger "Ermak-5". Experience of Development and Implementation," *Seismic Instruments*, vol. 55, no. 2, pp. 117–128, Apr 2019. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.3103/S0747923919020051>
- [17] J. Peterson, "Observation and modeling of seismic background noise," U.S. Geological Survey, Tech. Rep., 1993.
- [18] J. L. Soler-Llorens, J. J. Galiana-Merino, J. J. Giner-Caturla, P. Jauregui-Eslava, S. Rosa-Cintas, J. Rosa-Herranz, and B. Y. Nassim Benabdeloued, "Design and test of Geophonino-3D: A low-cost three-component seismic noise recorder for the application of the H/V method," *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 269, pp. 342–354, Jan 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424717306088>

- [19] S. Mertl, "Performance of the seismic data recorder Ruwai," Mertl Research GmbH, Tech. Rep. 20170207-01, 2017. [Online]. Available: https://www.mertl-research.at/assets/doc/20170207-seisrockht-sm-performance_of_the_ruwai_recording_system.pdf
- [20] M. Technology Inc., "dsPIC30F3014, dsPIC30F4013 Data Sheet," 2004. [Online]. Available: <http://www1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70138c.pdf>
- [21] Lennartz, "LE-xD Seismometer Family," p. 30, 2011.
- [22] Burr-Brown Corporation, "INA114," 1992. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/sbos014/sbos014.pdf>
- [23] Analog Devices, "ADG706/ADG707: CMOS, +1.8 V to +5.5 V/+2.5 V, 2.5 Ohm Low-Voltage, 8-/16-Channel Multiplexers," pp. 1–12, 2002. [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG706_707.pdf
- [24] E. Lai, *Converting analog to digital signals and vice versa*. Elsevier, 2003, pp. 14–49. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750657983500023>
- [25] Adafruit, "Adafruit Ultimate GPS ver. 3," p. 50, 2020. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps/>
- [26] Maxim Integrated, "DS 1307 64 x 8 , Serial , I2C Real-Time Clock," pp. 1–14, 2015. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>
- [27] P. S. Foundation. (2020) Welcome to Python.org. [Online]. Available: <https://www.python.org/>
- [28] T. K. Ahern, R. Casey, D. Barnes, R. Benson, and T. Knight, "Seed Reference Manual," p. 224, 2012. [Online]. Available: http://www.fdsn.org/pdf/SEEDManual_V2.4.pdf
- [29] O. D. Team. (2020) Welcome to the ObsPy Documentation! [Online]. Available: <https://docs.obspy.org/>
- [30] Kinematics, "OBSIDIAN 4X-36X," p. 3, 2019. [Online]. Available: <https://kinematics.com/wp-content/uploads/2017/04/datasheet-obsidian-4x-8x-12x-24x-36x-accelerograph-kinematics.pdf>
- [31] O. D. Team. (2020) ObsPy Tutorial. [Online]. Available: <https://docs.obspy.org/tutorial/index.html>
- [32] D. E. McNamara, "Ambient Noise Levels in the Continental United States," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 94, no. 4, pp. 1517–1527, Aug 2004. [Online]. Available: <https://pubs.geoscienceworld.org/bssa/article/94/4/1517-1527/121021>



Sebastián Placencia nació en Sígsig, Azuay, Ecuador, en 1990. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones por la Universidad de Cuenca, año 2016. Trabaja como investigador desde 2016, para la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC). Actualmente es parte del grupo de investigación de la Red Sísmica del Austro (RSA), en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.



Remigio Guevara nació en Cuenca, Ecuador en 1972. Ingeniero Eléctrico graduado de la Universidad de Cuenca en 1998 y Magíster en Gestión de Mantenimiento en la Universidad del Azuay en 2018. Ha laborado en la Red Sísmica del Austro, Universidad de Cuenca, desde el año de 1999 como investigador dentro del área de instrumentación sísmica y mantenimiento de la red sísmológica. Impartió las cátedras de Microprocesadores y Microcontroladores, Control, Domótica y Matemáticas aplicadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. Actualmente está a cargo de la gestión administrativa, así como del área de instrumentación y electrónica de la Red Sísmica del Austro.



Iván Palacios nació en Cuenca, Ecuador, en 1991. Recibió el grado de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones por la Universidad de Cuenca, Ecuador, en 2016 y el Máster Universitario en Automática y Robótica por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España, en 2019. Desde el 2015 trabaja en la Red Sísmica del Austro (RSA), Universidad de Cuenca, en el área de instrumentación y electrónica. Además, actualmente es investigador en un proyecto de la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC).



Sebastián Abril nació en Cuenca, Ecuador, en 1991. Recibió el grado de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones por la Universidad de Cuenca en 2016, actualmente se encuentra realizando un postgrado en Industrias 4.0. Desde 2015 trabaja en la Red Sísmica del Austro, departamento adjunto a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, desempeñándose en el área de desarrollo de prototipos y software. Sus intereses de investigación son las tecnologías de bajo costo para monitoreo y gestión remota de equipos de IoT.