

Sistema de Adquisición de Datos Sísmicos

Ing. Ricardo Gabriel Sifón
Departamento Laboratorio Sismológico
Instituto Nacional de Prevención Sísmica
San Juan, Argentina
rsifon@inpres.gov.ar

Mg. Héctor Riso
Especialidad en Sistemas Embebidos
Instituto Universitario Aeronáutico
Córdoba, Argentina
hriso@iua.edu.ar

Abstract— El presente trabajo tiene como objeto adquirir señales sísmicas asociadas a la sismicidad local.

Para cumplir con tal fin se desarrolló un Sistema de Adquisición de Datos Sísmicos sobre una placa computadora reducida (Single Board Computer, SBC) Raspberry Pi Modelo B, integrándose el hardware necesario para su conexión con el instrumento sensor (sismómetro), encargado de percibir los movimientos sísmicos.

El dispositivo y software logrado es de fácil configuración. Permite la comunicación directa con un software de procesamiento y colección de datos, haciendo uso del difundido protocolo estándar en sismología SEEDLINK.

Keywords: *Raspberry Pi, sismología, SEEDLINK, EARTHWORM, procesamiento, adquisición, protocolo, cliente, servidor, Sistema.*

I. INTRODUCCIÓN.

En la mayoría de los países, diversos organismos se ocupan de monitorear la actividad sísmica. Sobre el territorio de la República Argentina, el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) es el encargado de llevar a cabo esta tarea. En particular la *sismicidad local* es un área de estudio e interés que está en curso en esta Institución.

Los sismos locales son aquellos eventos que ocurren dentro de un radio de hasta 100 km desde donde se ubica el instrumento sensor (sismómetro) y tienen como característica un valor de frecuencia que oscila entre 0 y 100 Hz [10]. A pesar de que algunos de estos sismos son de magnitud menor a 2 en la escala Richter [1], y no son percibidos en la vida cotidiana de las personas, su estudio es de gran importancia puesto que la mayoría de los sismos de mayor intensidad siempre están precedidos de sismos de menor intensidad e imperceptibles para las personas. Además su registro y análisis sirve para un mejor diseño futuro de estructuras, prospección y análisis de suelo, y elaboración de sistemas de alerta.

El INPRES cuenta con una Red Nacional de Estaciones Sismológicas (RNES) distribuida en todo el país. Básicamente cada una de las Estaciones Sismológicas, cuentan con un sismómetro que registra los eventos y con un Sistema de Adquisición de Datos (Data Acquisition System, DAS).

Cada Estación Sismológica transmite los datos registrados hacia el INPRES, colectados mediante un software de procesamiento y colección de datos. Tal software denominado EARTHWORM [2] es de código abierto. Fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y difundido por los organismos de los diferentes países. Es actualizado y mantenido por la mancomunada contribución de importantes grupos de desarrolladores de diversos servicios sismológicos del mundo.

El establecimiento de la comunicación entre EARTHWORM y los distintos DAS con los que cuenta el INPRES debe realizarse a través de un software propietario (provisto por cada empresa fabricante de los DAS) que hace las veces de intermediario entre EARTHWORM y cada uno de los DAS.

Por lo expresado, se hace necesario disponer de un Servidor dedicado, para alojar y ejecutar el software propietario de cada DAS (Figura 1).

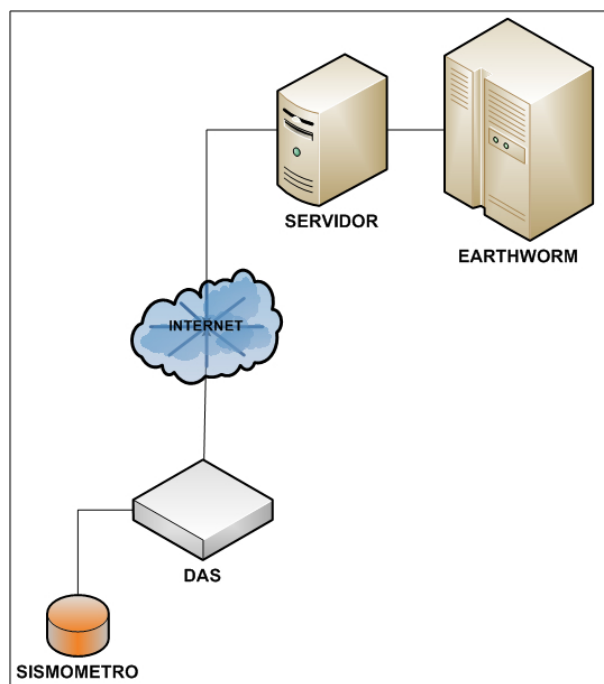


Figura 1. Esquema de conexión entre los DAS y EARTHWORM.

Por sus características propias los organismos sismológicos (como INPRES) están bajo modificación, ampliación y actualización constante de sus redes y estaciones. Al depender de software propietario para obtener los datos, se presentan dificultades ante una modificación que se pretenda efectuar al software EARTHWORM. Aumentando la complejidad, mantenimiento y operación de la RNES. El presente trabajo busca conseguir un sistema de adquisición capaz de adquirir las señales sísmicas como también flexibilidad, conexionado e independencia de terceros.

II. REQUERIMIENTOS.

A continuación se describen los requerimientos necesarios para este trabajo:

1. Desarrollar un Sistema que permita la comunicación directa con EARTHWORM sin necesidad de utilizar un software intermediario, ni el desarrollo de un módulo adicional para EARTHWORM.
2. El registro de datos será transmitido a través de Internet.
3. Los sismómetros adquiridos por el INPRES son los denominados de período corto, de la firma Teledyne Geotech, modelo S-13[8]. Este tipo de sensor permite registrar sismos con un ancho de banda en el rango de 0 a 100 Hz, siendo óptimos para el objeto de estudio del presente trabajo. Su salida es una tensión diferencial proporcional a la velocidad del suelo con valor máximo de 40 Vpp, siendo sensible al ruido producido por fuentes externas, como la señal de la red eléctrica y el movimiento ocasionado por situaciones ambientales próximas al sensor.
4. El Sistema debe ser capaz de registrar de forma óptima sismos locales que se encuentren dentro del rango de magnitud 2 a 4 en la escala Richter.
5. La señal de tensión analógica, entregada por el sismómetro debe ser acondicionada para posibilitar el registro de sismos locales.
6. Las estaciones sismológicas se ubican en lugares geológicamente estratégicos, que por lo general son zonas alejadas de las grandes ciudades, lo que dificulta la operación del DAS en forma local por parte de un operario en cualquier instante. Por lo cual resulta imprescindible poder configurar los parámetros esenciales del DAS y operar el mismo en forma remota.

III. PROPUESTA DE DESARROLLO.

En base a los requerimientos planteados en la sección anterior, se propone realizar un Sistema de Adquisición de Datos que permita enviar directamente los datos capturados en tiempo real a través de Internet al Sistema Colector de Datos EARTHWORM (Figura 2).

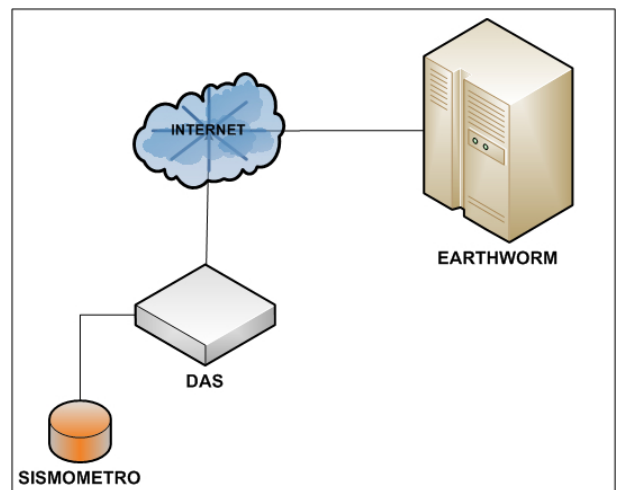


Figura 2. Propuesta de Desarrollo.

El dispositivo tendrá instalado un Web Server embebido, que posibilitará al usuario realizar la configuración y puesta en marcha del mismo.

La realización del Sistema propuesto implica el desarrollo de dos partes claramente diferenciables, una concerniente al Hardware y otra al Software.

En la siguiente sección se detallará cada una de ellas.

IV. DESARROLLO DEL SISTEMA.

A. DESARROLLO DEL HARDWARE.

A1. Plataforma de Desarrollo.

Entre los requerimientos citados en la sección II, se encuentran dos que son los que llevan a optar por la plataforma de desarrollo a utilizar. El primero de ellos, motivación principal para la elaboración de este trabajo, es que el Sistema pueda establecer una comunicación directa con EARTHWORM sin implementar un módulo de Software adicional. El segundo, transmitir los datos registrados por el sismómetro a través de Internet.

EARTHWORM cuenta con un módulo denominado SLINK2EW, que permite comunicarse en forma directa con él, a través del uso del protocolo SEEDLINK [3] (basado en el protocolo TCP). Este protocolo está escrito en lenguaje C y es empleado de forma masiva por las más importantes instituciones sismológicas del mundo para el intercambio de datos sísmicos.

De lo mencionado en el párrafo anterior, se desprende el escoger una plataforma cuya arquitectura provea conectividad sobre un stack TCP/IP y que posibilite la implementación del protocolo SEEDLINK.

Entre las distintas alternativas al momento de escoger una plataforma para la elaboración del Sistema propuesto, se opta por escoger la SBC Raspberry Pi [4], la cual cuenta con conectividad sobre un stack TCP/IP, requisito para la implementación del protocolo SEEDLINK.

El protocolo de comunicación escogido debe ser implementado bajo Sistema Operativo Linux. La Raspberry Pi ejecuta Raspbian [5], distribución de GNU/Linux basada en Debian.

Es importante destacar que sobre Raspbian, las librerías necesarias para implementar el protocolo SEEDLINK fueron utilizadas con éxito a través del software SEISCOMP [6].

Las características más relevantes de la Raspberry Pi son:

- SoC (System on a Chip) Broadcom BCM2835.
- Procesador ARM 1176JZFS de 32 bits y 700MHz de velocidad.
- Memoria SDRAM de 512MB.

A2. Acondicionamiento de la señal de entrada.

La señal que registra el sismómetro S-13 puede alcanzar la frecuencia de 100 Hz [8], mientras que las señales sísmicas de interés para este trabajo tienen un valor máximo de 10 Hz [22]. Por ello es necesario acondicionar las señales obtenidas por el sismómetro. Esto se logra amplificando y filtrando la señal. Luego la Raspberry Pi debe procesar y transmitir los registros hacia EARTHWORM, por lo cual se deben digitalizar los datos obtenidos por el sensor.

➤ Amplificación.

La señal de salida del sismómetro S-13 es diferencial y sensible al ruido producido por fuentes externas, provenientes de la red eléctrica (50 Hz de frecuencia) y al medio ambiente próximo a él. El máximo valor de tensión que entrega el sismómetro ante un sismo de magnitud 4 en la escala de Richter es de 2 Vpp [22].

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, fue tomada la decisión de implementar un amplificador de instrumentación [18]. Estos dispositivos presentan una ganancia diferencial precisa y estable, en el rango de 1 a 1000 en la mayoría de los casos y su valor puede controlarse mediante una resistencia externa. Presentan una Relación de Rechazo de Modo Común (Common Mode Rejection Ratio, CMRR) elevada, lo que posibilita tener una buena relación señal a ruido en todo el rango de frecuencia de interés. Además su alta impedancia de entrada, permite aislar del sismómetro el resto del circuito.

A partir de las características mencionadas en el párrafo anterior fueron evaluados distintos amplificadores de instrumentación que pueden cumplir con los requerimientos solicitados (Tabla 1).

Para elegir entre las diferentes opciones fue definida una figura de mérito, asignándose un peso a cada uno de los parámetros (Tabla 2). Una vez definido los parámetros y pesos correspondientes, la siguiente fórmula fue aplicada:

$$FM = 40 * \left(\frac{P1_x}{P1_{MAX}} \right) + 25 * \left(\frac{P2_{MIN}}{P2_x} \right) + 10 * \left(\frac{P3_{MIN}}{P3_x} + \frac{P5_{MIN}}{P5_x} \right) + 15 * \left(\frac{P4_{MIN}}{P4_x} \right)$$

En base a los resultados obtenidos (Tabla 3) tras aplicar la ecuación 1, fue elegido para implementar el circuito integrado AD622ANZ de Analog Devices [9].

Parámetros	Referencia		
	AD622ANZ	INA128PA	LT1789
CMRR @G = 100 [dB]	118	110	100
Ruido total referido a la entrada @G = 100 [uV]	0.3	0.2	1
No linealidad en la ganancia @G = 100 [ppm]	10	5	18
Error en la ganancia @G = 100 [%]	0.2	0.5	0.27
Precio [US\$]	6.21	8.32	6.41

Tabla 1 – Amplificadores de Instrumentación evaluados.

Parámetro	Peso
P1 - CMRR	40
P2 - Ruido total referido a la entrada	25
P3 - No linealidad en la ganancia	10
P4 – Error en la ganancia	15
P5 - Precio	10

Tabla 2 – Pesos asignados a cada uno de los parámetros de interés.

Dispositivo	LT1789	INA128PA	AD622ANZ
Figura de Mérito	67.02	90.65	91.66

Tabla 3 – Figura de Mérito obtenida para cada dispositivo.

El valor de ganancia del amplificador (Figura 3) fue establecido de acuerdo al valor de la resistencia RG y será escogida de acuerdo al máximo valor de tensión que tenga la entrada de la etapa de digitalización, la cual será desarrollada más adelante.

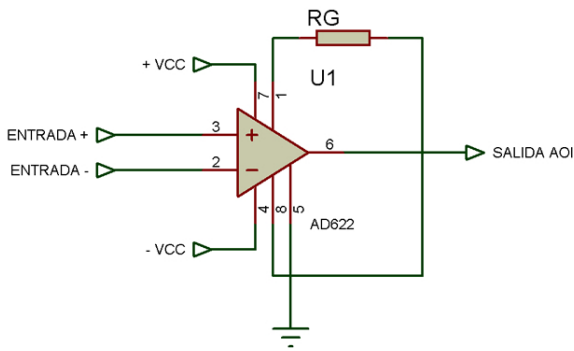


Figura 3. Etapa de amplificación.

➤ Filtrado.

La magnitud de la señal sísmica a registrar por el sismómetro debe estar entre los valores 2 y 4 de magnitud en la escala Richter (ítem 4 de la sección Requerimientos). Debido a esto, el ancho de banda de interés se encuentra en el rango de 0 a 10 Hz [22].

Además, como fue mencionado anteriormente, la señal entregada por el sismómetro debe ser digitalizada para ser procesada por la Raspberry Pi. Según el Teorema de Nyquist [19], para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo (Sampling Frequency, FS) sea igual o superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. Si esto no se cumple aparece un fenómeno denominado Aliasing [19], que hace que la banda de frecuencia de la señal muestreada se repita (tenga un alias) a múltiplos de la frecuencia de muestreo. Es por ello que, si no es escogida la frecuencia de muestreo correcta, el alias puede quedar solapado con la banda de la señal base produciendo solapamiento u overlapping.

Por este motivo, debe ser implementado un filtro analógico Anti-Aliasing antes de proceder a digitalizar la señal. Para eliminar las frecuencias por encima de un cierto umbral, debe ser un filtro pasa bajos, que permita limitar el ancho de banda de la señal y evitar la aparición del efecto de solapamiento. Además, su respuesta debe ser máximamente plana, tanto en la banda de paso como en la banda de atenuación. La topología que presenta estas características es la de Butterworth, en configuración Sallen Key [20].

Para el diseño del filtro Anti-Aliasing fue utilizado el toolbook de MATLAB denominado Analog Filter Design [21], herramienta que permite el diseño, análisis y simulación de filtros activos a partir de la introducción de algunos parámetros, como la frecuencia de corte, ganancia, configuración del filtro, orden y tipo (Figura 4).

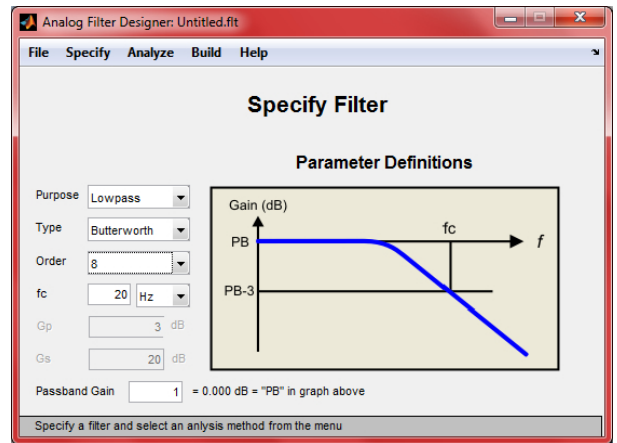


Figura 4. Analog Filter Design. MATLAB.

La frecuencia de corte para el diseño del filtro, a fines prácticos, fue elegida en 20 Hz (el doble del valor de interés), para que en el rango de 0 a 10 Hz el desplazamiento de fase introducido por el filtro analógico Anti-Aliasing [20] sea lineal (retraso de grupo constante) [19]. En una etapa posterior, luego de tener en forma digital la señal sísmica, se procederá a aplicar un filtro digital por Software, como será explicado más adelante.

La frecuencia de muestreo utilizada en sismología está en el rango comprendido entre 1 y 200 Hz [10]. Para el desarrollo del sistema propuesto se utilizará un valor de 100 Hz, el cual es el escogido por el INPRES para todas sus estaciones [17].

El valor máximo de atenuación de la señal en la banda de atenuación es obtenido calculando la Relación Señal a Ruido (Signal Noise Relation, SNR), que es el cociente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido de fondo (generado por el proceso de cuantificación). Como el ruido de fondo está vinculado directamente al ruido de cuantificación (ruido blanco) [24], la SNR depende del número de bits utilizados para cuantificar [23] en el proceso de digitalizar una señal.

$$SNR = 6.02 * N + 1.76 \text{ dB}$$

Ecuación 2. Fórmula para el cálculo de la SNR.

En la etapa de digitalización será utilizado un Conversor Analógico a Digital (Analog to Digital Converter, ADC) [23]. La cantidad de bits del ADC a utilizar está directamente asociada a la magnitud del sismo que se quiere registrar. Un sismo de magnitud 2 registrado a 100 km de distancia del sismómetro presenta el número de cuentas de 200 (límite inferior si la señal necesita ser registrada con un valor razonable de SNR), y si el ADC utilizado es de 16 bits [10]. Este dispositivo presenta en su salida 32768 cuentas (teniendo en cuenta que su entrada acepta valores positivos y negativos), con un rango dinámico [23] igual a:

$$\text{Rango Dinámico} = \frac{32768}{200} \cong 164$$

Ecuación 3. Rango Dinámico del ADC.

Suponiendo que la magnitud se incrementa con el logaritmo de la amplitud, la magnitud máxima a registrar con un ADC de 16 bits es de:

$$\text{Magnitud}_{MAX} = 2.0 + \log_{10} 164 \cong 4.2$$

Ecuación 4. Valor máximo de magnitud con 16 bits.

Con lo cual, un ADC de 16 bits, cumple con los requisitos solicitados para el registro de sismos locales de magnitud entre 2 y 4 en la escala de Richter.

Teniendo definido el número de bits en el proceso de digitalización de la señal, el valor de SNR es:

$$\text{SNR} = 6.02 * 16 + 1.76 \text{ dB} = 98 \text{ dB}$$

Ecuación 5. Cálculo de la SNR para el filtro Anti-Aliasing.

Debido a que la banda de paso esta comprendida entre 0 y 20 Hz (siendo 10 Hz el máximo valor de interés a registrar por el sismómetro), los valores de frecuencia que ocasionan Aliasing se obtienen a partir de la ecuación 6 [19] y oscilan entre 80 y 100 Hz:

$$\text{Alias Frec.} = |(FS \text{ más cercana a la frec. de entrada} - \text{frec. de entrada})|$$

Ecuación 6. Fórmula para el cálculo de Aliasing.

Las frecuencias que ocasionan Aliasing son aquellas que se encuentran entre los 80 y 100 Hz.

La ganancia del filtro Anti-Aliasing en la banda de paso es de 0 dB, ya que la ganancia del sistema fue establecida en la etapa de amplificación.

El filtro obtenido a través del toolbox de MATLAB fue de orden 8, conformado con 4 etapas tipo Butterworth, en configuración Sallen Key (Figura 5).

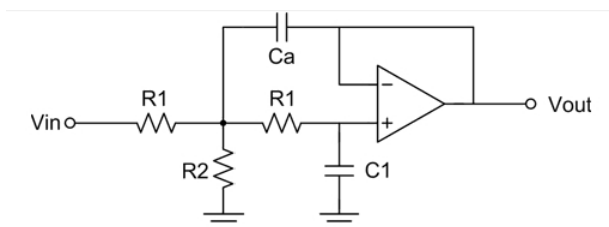


Figura 5. Etapa del filtro Anti-Aliasing, configuración Sallen-Key.

Los valores de resistencia y capacitores calculados para cada etapa del filtro son mostrados en la Tabla 4.

La respuesta en frecuencia y fase del filtro diseñado es la siguiente:

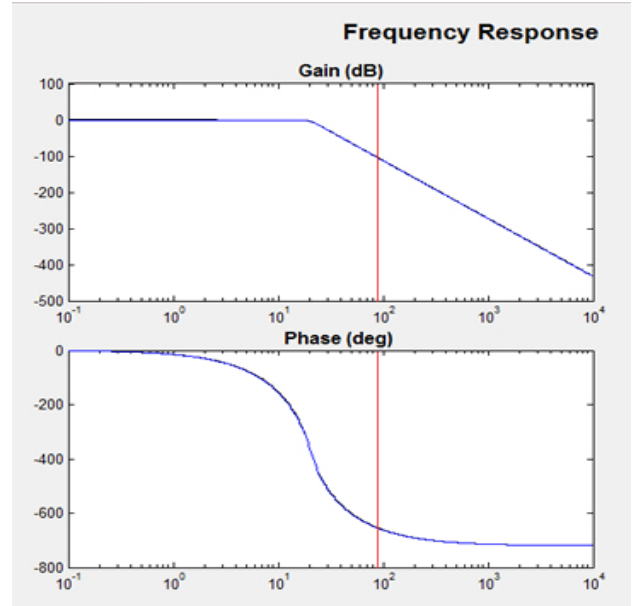


Figura 6. Respuesta en frecuencia y fase del filtro Anti-Aliasing.

Etapa	Componente			
	Ca	C1	R1	R2
Nº 1	1 µF	1 µF	8.2 KΩ	---
Nº 2	1 µF	680 nF	10 KΩ	---
Nº 3	2.2 µF	680 nF	6.8 KΩ	---
Nº 4	1 µF	39 nF	39 KΩ	---
Valor				

Tabla 4 – Valores de Resistencia y Capacidad del filtro Anti-Aliasing.

El amplificador operacional que fue utilizado en el filtro Anti-Aliasing fue seleccionado entre varias opciones evaluadas (Tabla 5), haciendo uso de una figura de mérito (ecuación 7) para su elección. Un valor de peso fue asignado a cada uno de los parámetros más relevantes a tener en cuenta en la elección del amplificador (Tabla 6). Cada circuito integrado que fue sometido a evaluación consta de 4 amplificadores operacionales.

$$FM = 25 * \left(\frac{P1_{MIN}}{P1_x} + \frac{P2_{MIN}}{P2_x} \right) + 10 * \left(\frac{P3_x}{P3_{MAX}} + \frac{P4_{MIN}}{P4_x} \right) + 15 * \left(\frac{P5_x}{P5_{MAX}} + \frac{P6_x}{P6_{MAX}} \right)$$

Ecuación 7. Fórmula de Figura de Mérito.

De acuerdo a los resultados obtenidos luego de aplicar la fórmula de la figura de mérito, el amplificador seleccionado fue el LM324 (Tabla 7) de Texas Instruments [25].

Parámetros	Referencia		
	TL084	LM324	LF347
CMRR [dB]	86	80	100
Factor de Rechazo a Fuente de Alimentación (Power Supply Rejection Ratio, PSRR) [dB]	86	110	100
Ganancia – Ancho de Banda [MHz]	3	1.3	3
Ruido referido a la entrada [nV/√Hz]	18	40	18
Corriente de Alimentación [mA]	1.4	1.2	8
Precio [US\$]	0.45	0.28	1.00

Tabla 5 – Amplificadores Operacionales evaluados para el diseño del filtro Anti-Aliasing.

Parámetro	Peso
P1 – Precio	25
P2 – Corriente de Alimentación	25
P3 - Ganancia – Ancho de Banda	15
P4 - Ruido referido a la entrada	15
P5 – CMRR	10
P6 - PSRR	10

Tabla 6 – Pesos asignados a cada uno de los parámetros de interés.

Dispositivo	LF347	TL084	LM324
Figura de Mérito	59.38	81.61	85.83

Tabla 7 – Figura de Mérito obtenida para cada dispositivo.

➤ Digitalización de la señal.

La señal (analógica) registrada por el sismómetro es digitalizada a través de un ADC de 16 bits de resolución. La elección del número de bits utilizados en esta etapa se justificó en la sección anterior (Filtrado).

Como se mencionó anteriormente, la frecuencia de muestreo utilizada es de 100 Hz, cinco veces mayor que la frecuencia de corte del filtro Anti-Aliasing, cumpliendo de esta forma con el Teorema de Nyquist [19]. La salida del filtro es una tensión cuyo valor es de 10 Vpp, por lo cual debe escogerse un ADC cuya entrada acepte valores de tensión negativos o acondicionar la señal a la entrada del mismo.

La señal digitalizada será enviada a la SBC Raspberry Pi, la cual cuenta con un bus de Interfaz de Periféricos Serie

(Serial Peripheral Interface, SPI) [7] para la conexión de dispositivos externos. Es por ello que a la hora de escoger por un ADC, este es un parámetro a tener en cuenta.

De la misma forma en que se procedió en etapas anteriores (Amplificación y Filtrado), para escoger el ADC más adecuado para desarrollar este trabajo, se utilizó una figura de mérito (ecuación 8), asignando un peso (Tabla 9) a los parámetros más relevantes (Tabla 8).

$$FM = 25 * \left(\frac{P1_{MIN}}{P1_x} + \frac{P2_x}{P2_{MAX}} \right) + 20 * \left(\frac{P3_{MIN}}{P3_x} \right) + 10 * \left(\frac{P4_{MIN}}{P4_x} + \frac{P5_x}{P5_{MAX}} + \frac{P6_x}{P6_{MAX}} \right)$$

Ecuación 8. Fórmula de Figura de Mérito.

Parámetros	Dispositivo		
	ADS8507	AD974	ADS7813
Número efectivo de bits [bits]	15	15	15
SNR [dB]	88	83	89
Relación Señal a Ruido y Distorsión (Signal-to-Noise And Distortion, SINAD) [dB]	88	83	89
Integral Linearity Error (INL) [LSB]	3	3	3
Disipación de Potencia [mW]	30	35	120
Precio [US\$]	22.24	56.29	39.19

Tabla 8 – ADC evaluados para el desarrollo del trabajo.

Parámetro	Peso
P1 – Precio	25
P2 – Número Efectivo de Bits	25
P3 - INL	20
P4 – Disipación de Potencia	10
P5 – SNR	10
P6 - SINAD	10

Tabla 9 – Pesos asignados a cada uno de los parámetros de interés.

Tras utilizar la ecuación 8, el ADC seleccionado fue el ADS8507 (Tabla 10) de Texas Instruments [11]. Este dispositivo acepta 10 Vpp de tensión analógica en sus entradas, lo que permite establecer el valor de la resistencia RG, tal como se mencionó en la etapa de Amplificación. Al ser de 2 Vpp la máxima tensión a registrar por el sismómetro para un sismo de magnitud 4 en la escala de

Richter, para aprovechar todo el rango del ADC, fue establecido un valor de ganancia de 10 en la etapa de Amplificación. El valor de RG (5,6kΩ) se escogió teniendo en cuenta la información (ecuación 9) provista por el fabricante [9] del AD622ANZ.

$$R_G = \frac{50.5k\Omega}{G - 1}$$

Ecuación 9. Cálculo de RG.

Dispositivo	ADS7813	AD974	ADS8507
Figura de Mérito	81.68	82.10	99.77

Tabla 10 – Figura de Mérito obtenida para cada ADC.

B. DESARROLLO DEL SOFTWARE.

B1. Transmisión de datos.

Una vez realizado el acondicionamiento de la señal sísmica registrada por el sismómetro, es necesario llevar a cabo la transmisión de la misma hacia EARTHWORM.

Tal como fue mencionado en la sección IV, se hará uso de la SBC Raspberry Pi, como plataforma de desarrollo, de Raspbian como Sistema Operativo, y del protocolo SEEDLINK, para establecer una comunicación directa con EARTHWORM.

Establecer una comunicación entre la SBC Raspberry Pi y EARTHWORM, haciendo uso del protocolo SEEDLINK, debe llevarse a cabo a través de una arquitectura Cliente-Servidor. EARTHWORM cuenta un módulo que actúa como Cliente SEEDLINK, denominado SLINK2EW.

En la SBC Raspeberry Pi se optó por instalar la aplicación RINGSERVER [16], que hace las veces de Servidor SEEDLINK, y fue desarrollada por el Incorporated Research Institutions For Seismology (IRIS) para posibilitar el intercambio de datos entre diversas instituciones sismológicas. RINGSERVER permite evitar la pérdida de datos ante una interrupción en la comunicación con EARTHWORM. Cuando esto sucede, la transmisión de datos inicia en el punto en el que se encontraba al momento de ocurrir el corte.

Los datos que RINGSERVER envía a cada Cliente que los solicita, son registros Mini-SEED [14] de 512 bytes. Este formato de datos es un estándar a nivel mundial para el intercambio de eventos sísmicos.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, fue desarrollada una aplicación que, a partir de los datos registrados por el sismómetro, acondicionados y posteriormente digitalizados por el ADC (ADS8507), crea registros Mini-SEED con el fin de ser interpretados por RINGSERVER. El diagrama general de la misma se muestra en la figura 7.

Debido a que fue necesario utilizar librerías externas para establecer una comunicación con el ADC, crear y enviar registros Mini-SEED hacia RINGSERVER, y todas ellas están escritas en Lenguaje ANSI C, este lenguaje de programación fue utilizado para realizar la aplicación antes mencionada.

Al momento de ejecutarse la aplicación, ésta lee un archivo de configuración, el cual contiene una serie de parámetros necesarios para su normal funcionamiento. La descripción y modificación de estos parámetros será realizada a través de una interfaz Web, cuyo funcionamiento y modo de operación será explicado más adelante.

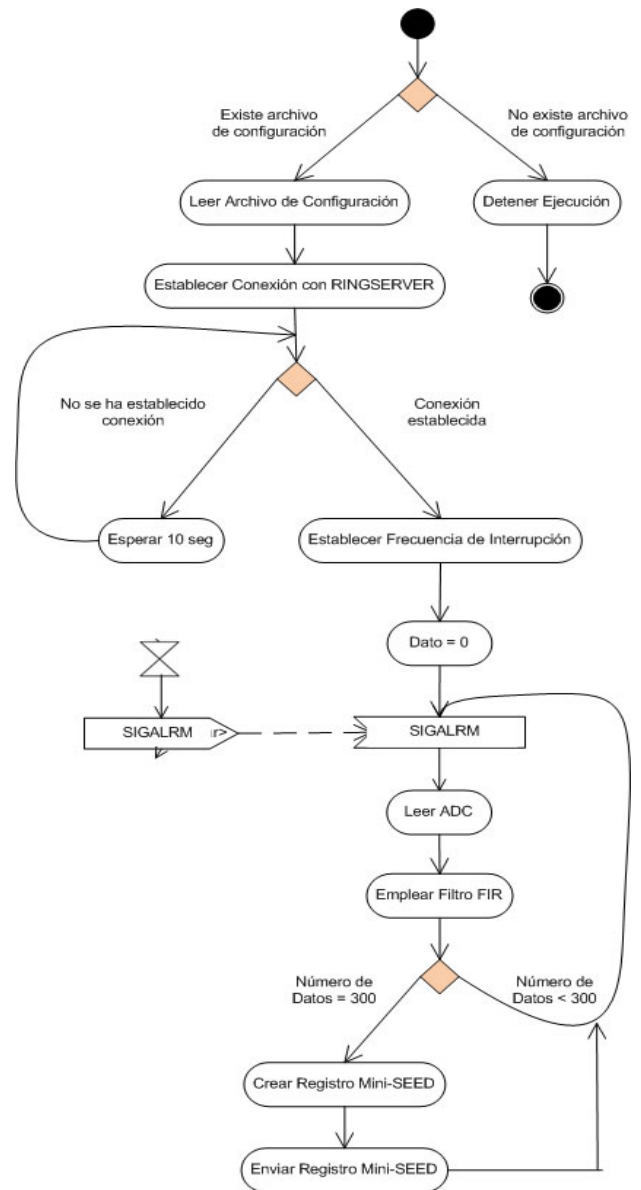


Figura 7. Diagrama de Actividades de la aplicación desarrollada.

Cada una de las tareas que realiza la aplicación se detallan a continuación:

➤ Lectura de datos del ADC.

La lectura de los datos desde el ADC por parte de la SBC Raspberry Pi se realiza a través de un bus SPI, haciendo uso de la librería Wiring Pi [26], que posee Raspbian, cada 10 ms (correspondiente a una frecuencia de muestreo de 100 Hz).

La frecuencia con que se procede a la lectura del bus SPI para obtener los datos provenientes del ADC, es obtenida a partir de la señal SIGALRM [27] del que dispone el Lenguaje ANSI C para su uso en Sistemas Operativos Unix/Linux. A continuación, se muestra una parte de la sección de código correspondiente a la utilización de SIGALRM en la aplicación.

```

/* Tiempo de repetición del contador (10ms) */
struct timeval tiempoRepeticion;
tiempoRepeticion.tv_sec=0;
tiempoRepeticion.tv_usec=10000;
/* Configuración del contador */
struct itimerval contador;
contador.it_interval=tiempoRepeticion;
/* Función tratamientoSenhal, encargada de leer el ADC */
/* cada vez que el contador finaliza */
signal(SIGALRM, tratamientoSenhal);
/* Inicio del contador */
setitimer(ITIMER_REAL, &contador, NULL);

```

Básicamente hay dos únicas funciones en la librería Wiring Pi para el uso del bus SPI, una para configurar, y otra para leer/escribir sobre el bus.

En el siguiente cuadro de texto se observa el código utilizado para la manipulación del bus SPI.

```

/* Configuración del bus SPI */
/* Canal 0. Velocidad de 1 Mhz */
wiringPiSPISetup(0, 1000000);
unsigned char ByteSPI[7];
/* Lectura del ADC */
void tratamientoSenhal(int idSenhal)
{
    wiringPiSPIDataRW(0, ByteSPI, 2);
}

```

➤ Filtrado Digital

Cada dato obtenido del ADC es filtrado digitalmente, como fue mencionado en la sección IV. La utilización de un filtro digital tiene como ventajas: inmunidad a ruido fuerte, mucha exactitud, fácil modificación de las características del filtro, entre otras [19].

El filtro digital puede ser del tipo Respuesta Finita Impulsiva (Finite Impulse Response, FIR) o de Respuesta Infinita Impulsiva (Infinite Impulse Response, IIR) [30]. Fue escogido para implementarse en la aplicación un filtro FIR, debido a que son siempre estables y capaces de tener una fase lineal (retraso constante de grupo), lo que conlleva a una ausencia total de distorsión. Además son más fáciles de diseñar e implementar que un filtro IIR, a pesar de tener una longitud más alta para especificaciones idénticas, que éstos últimos [19].

Los filtros FIR, que como su nombre indica, si la entrada es una señal impulso la salida tendrá un número finito de términos no nulos.

Un filtro FIR de longitud M con entrada $x[n]$ y salida $y[n]$ se describe mediante la ecuación diferencial:

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots + b_{M-1}x[n-M+1] = \sum_{k=0}^{M-1} b_k x[n-k]$$

Ecuación 10. Expresión matemática de un filtro FIR.

Donde b_k representa los coeficientes del filtro. La respuesta del filtro FIR es por tanto, una suma ponderada de valores pasados y presentes de la entrada.

También es posible expresar la salida del filtro $y[n]$ como una convolución de la entrada $x[n]$ con la respuesta al impulso del filtro $h[n]$:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} h[k].x[n-k]$$

Ecuación 11. Expresión de un filtro FIR a través de la convolución.

En la figura 8 se observa el diagrama en bloques de la estructura básica del filtro FIR, donde los términos $h(n)$ son los coeficientes del filtro y los bloques T representan los retardos.

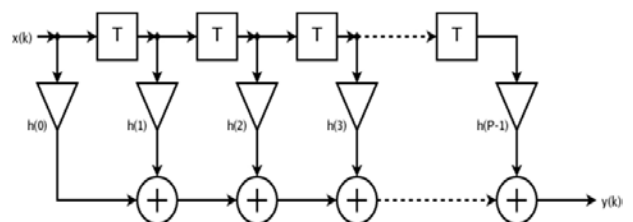


Figura 8. Diagrama en bloques de la estructura de un filtro FIR.

El diseño del filtro digital fue realizado haciendo uso del toolbox de MATLAB denominado Filter Design and Analysis Tool (FDATool) [31], herramienta que permite el diseño y análisis de filtros FIR e IIR, a partir de la elección de varios parámetros, como el tipo de respuesta, método de diseño, frecuencia y ganancia en la banda de paso y rechazo, y frecuencia de muestreo (Figura 9).

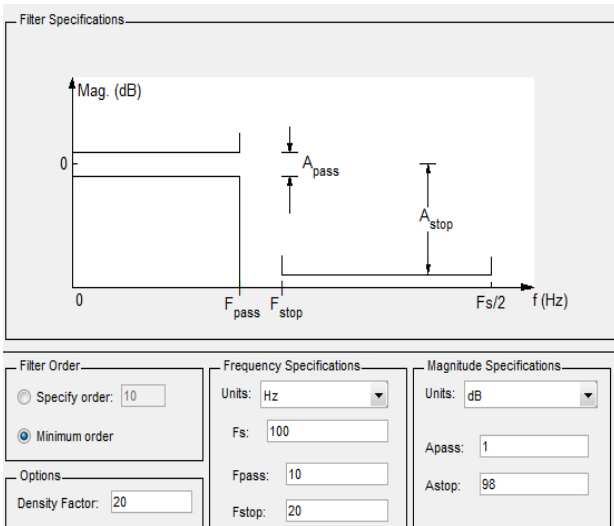


Figura 9. Filter Design and Analysis Tool (FDATool). MATLAB.

El filtro FIR escogido es del tipo pasa bajos, cuyo valor de frecuencia en la banda de paso es de 0 a 10 Hz, y de 10 a 20 Hz en la banda de transición. En la banda de paso fue escogido un valor de atenuación de 1dB y en la banda de rechazo 98 dB, valor obtenido del cálculo de la SNR (ecuación 5) en la sección anterior. La técnica de diseño seleccionada para la realización del filtro FIR fue equiripple. La misma permite obtener un filtro óptimo, en el sentido que la magnitud del ripple es mínima en todas las bandas [30]. El número de coeficientes obtenidos fue de 31.

La respuesta de magnitud y fase del filtro diseñado se observa a continuación:

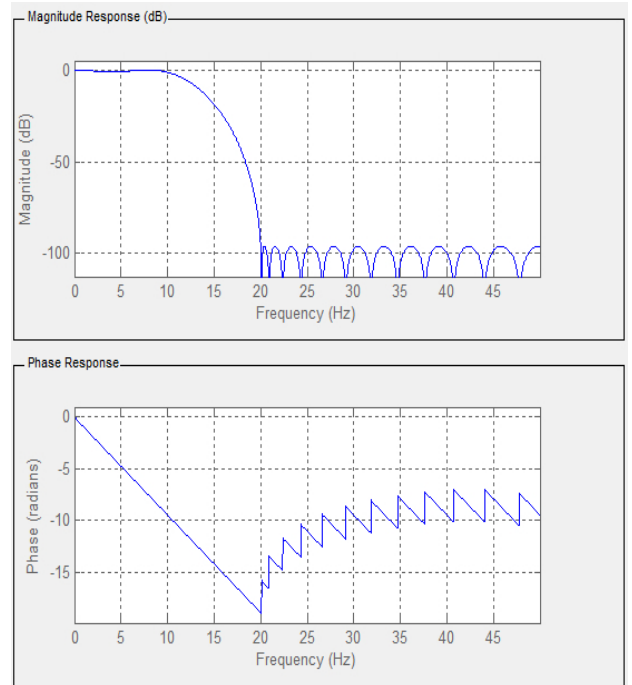


Figura 10. Respuesta de Magnitud y Fase del filtro FIR.

El código utilizado para llevar a cabo la implementación del filtro FIR diseñado se observa en el siguiente cuadro de texto.

```

/* Filtro Digital FIR */
/* sample: dato - coef: coeficiente del filtro */
int32_t filtrofir (int sample, float *coef)
{
    static float yn = 0;
    static int N=30; // Numero de coeficientes del filtro.
    static float x[30] = {0};
    static int k = 0;
    for(k=0; k < N-1; k++)
    {
        x[N-k-1] = x[N-k-2];
    }
    x[0] = sample; // guardo dato de entrada a buffer.
    yn = 0;
    for(k=0; k < N; k++)
    {
        /* multiplicación de datos de entrada con coeficientes */
        yn += coef[k]*x[k];
    }
    return (int32_t) (yn + 0.5);
}

```

➤ Creación de registros Mini-SEED.

La creación de los registros Mini-SEED se realiza a través del uso de la librería LIBMSEED [15]. Un registro Mini-SEED de 512 bytes está compuesto por los siguientes campos:

1. Una cabecera de 48 bytes de longitud, cuyos campos más relevantes son:
 - Número de secuencia: Es un identificador para cada registro.
 - Detalle de la Estación Sismológica: Nombre de la Estación, Código de Red, Identificador de Canal y Ubicación, haciendo uso de la convención SCNL (Station – Channel – Network - Location).
 - Número de muestras que hay en el registro.
 - Tasa de muestreo.
 - Tiempo de la primera muestra que contiene el registro.
2. Dos campos denominados “blockettes”, tipo 1000 y 1001, de 8 bytes de longitud cada uno. La información más importante se ubica en el primer “blockette” y hace referencia al formato de codificación utilizada en el campo de datos. La Tabla 11 muestra los diferentes formatos que se pueden escoger para almacenar los valores entregados por la señal sísmica.
3. Un campo de datos con los valores registrados por el sismómetro, de 448 bytes de longitud. La cantidad de datos que se almacenan en cada registro depende del formato de codificación y de la frecuencia de muestreo escogida.

Código	Formato de Codificación
0	Texto ASCII
1	Entero de 16 bits
2	Entero de 24 bits
3	Entero de 32 bits
4	Punto Flotante según IEEE
5	Punto Flotante de Doble Precisión según IEEE
10	Compresión STEIM1
11	Compresión STEIM2

Tabla 11 – Formatos de codificación en un registro Mini-SEED.

Para el desarrollo del presente trabajo fue elegido un valor de 300 datos [29], para almacenar en cada registro

Mini-SEED, y codificados según el formato de compresión STEIM2 [28].

Cada vez que finaliza la creación de un registro Mini-SEED, se procede a enviarlo hacia RINGSERVER. Dicho procedimiento será descrito a continuación.

➤ Envío de datos a RINGSERVER.

Como fue mencionado anteriormente, cada registro Mini-SEED creado deberá ser enviado a RINGSERVER para que éste, a su vez, haciendo uso del protocolo SEEDLINK, los transmita a EARTHWORM. Esto será posible gracias a la implementación de la librería LIBDALI [13], la cual permite transferir registros Mini-SEED (a través de TCP/IP) por medio del protocolo DATALINK [12] hacia RINGSERVER.

El diagrama de conexión entre la aplicación (Cliente) y RINGSERVER se observa en la figura 11.

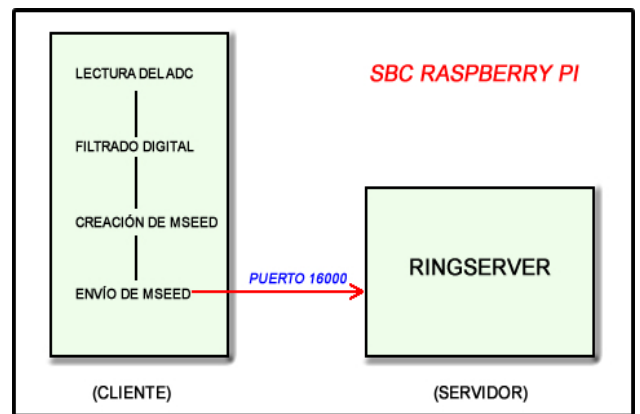


Figura 11. Envío de registros Mini-SEED hacia RINGSERVER.

B2. Configuración y Operación del DAS.

Uno de los requerimientos solicitados al momento de desarrollar este trabajo fue la posibilidad de configurar (parámetros esenciales) y operar el DAS en forma remota. Para cumplir con ello, será implementado un sitio Web dinámico desarrollado en Lenguaje PHP (Hypertext Preprocessor) [32].

PHP fue escogido debido a que brinda la posibilidad de generar contenido dinámico (se genera al momento de ser solicitado) y permite ejecutar aplicaciones y comandos del sistema del lado del Servidor (SBC Raspberry Pi). Para ejecutar PHP fue necesario implementar en la SBC Raspberry Pi un Servidor Web que soporte el mencionado Lenguaje. Por defecto, con la distribución GNU/Linux Raspbian viene incorporado Apache [33], el cual es un Servidor Web que soporta el Lenguaje PHP.

El sitio Web implementado, permitirá a través de una interfaz gráfica, modificar los siguientes parámetros del Sistema de Adquisición de Datos desarrollado:

1. Nombre de la Estación.

2. Identificador de Canal.
3. Código de Red a la que pertenece la Estación.
4. Número de puerto para establecer una comunicación con RINGSERVER (a través del protocolo DATALINK).
5. Número de puerto para establecer una comunicación con EARTHWORM (a través del protocolo SEEDLINK).
6. Nombre Único de Identificación del Servidor RINGSERVER (ID).

A través de un browser, mediante una dirección IP asignada por defecto, será posible ingresar al sitio Web del DAS, para observar y modificar los parámetros antes mencionados (Figura 12).

Los parámetros 5 y 6 son necesarios para establecer una comunicación entre RINGSERVER y EARTHWORM. Los mismos, luego de ser modificados, deberán almacenarse en un archivo de configuración, tal como se detalla en la documentación de RINGSERVER [16].

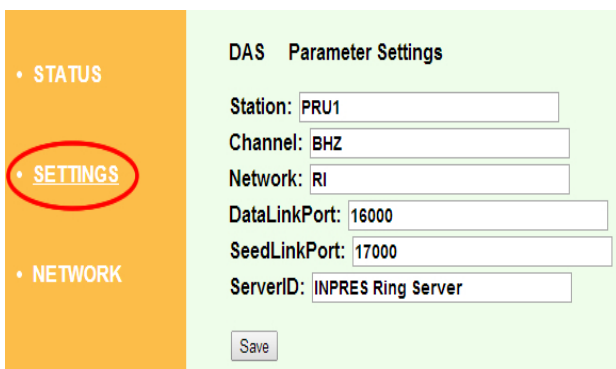


Figura 12. Modificación de parámetros del DAS.

A través de este sitio Web, el operario también podrá iniciar, detener, reiniciar y apagar el Sistema de Adquisición de Datos (Figura 13) en forma remota, tal como fue solicitado en uno de los requerimientos (sección II).

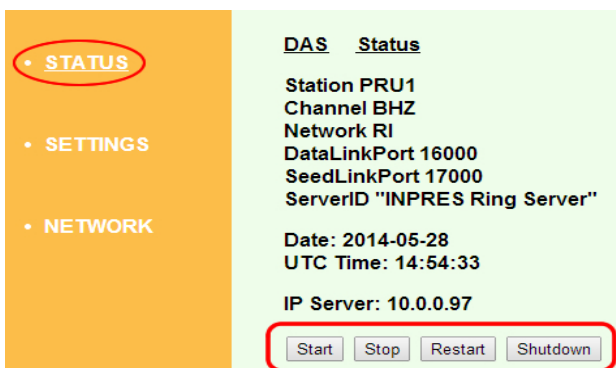


Figura 13. Operación del DAS a través del sitio Web.

Además, será posible modificar los parámetros concernientes a la configuración de red de la SBC Raspberry PI, como son: Dirección IP, Máscara de Red y Puerta de Enlace (Gateway).

V. VALIDACIÓN & VERIFICACIÓN

Se procedió a revisar unitariamente cada una de las partes que conforman el sistema, a fin de verificar que cada una cumpla con los requisitos propuestos.

Se realizaron mediciones en la entrada y salida de las etapas de Amplificación y Filtrado (acondicionamiento de la señal), utilizando como señal de referencia, la respuesta del sismómetro S-13 tras ser excitado por una señal sinusoidal de frecuencia variable [36]. El filtro Anti-Aliasing desarrollado, presentó un desplazamiento lineal con la frecuencia en la banda de interés (0 a 10 Hz), cumpliendo con las especificaciones planteadas en la etapa de diseño (figura 14), evitando de esta forma distorsión de la señal.

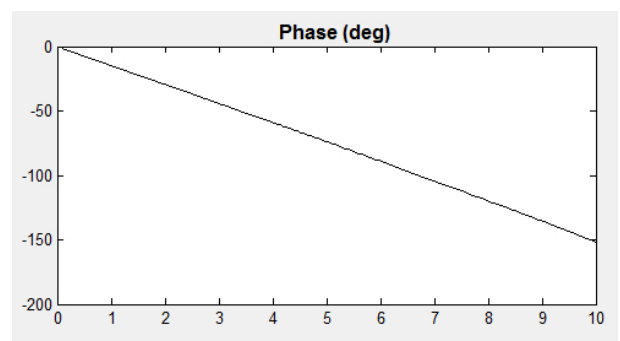


Figura 14. Respuesta de fase del filtro Anti-Aliasing.

Sobre la banda de paso del filtro la atenuación fue nula. En la banda de rechazo, ante una señal de 100 Hz, la atenuación fue superior a los 98 dB, valor planteado al momento del diseño del filtro (ecuación 5).

Se realizó también de forma unitaria, la verificación de la frecuencia de lectura del ADC (100 Hz) a través del bus SPI por parte de la SBC Raspberry Pi, haciendo uso de la señal SIGALRM.

Luego se procedió a integrar el Hardware, encargado de realizar el acondicionamiento de la señal, a la SBC Raspberry Pi, para efectuar la verificación del filtro digital implementado por Software, como así también la transmisión de datos hacia EARTHWORM.

Para efectuar las pruebas mencionadas en el párrafo anterior, se utilizó la misma señal de referencia que en el caso de la verificación del funcionamiento de la etapa de acondicionamiento de señal. Además fue necesario implementar un Servidor con EARTHWORM para verificar la comunicación del Sistema de Adquisición de Datos desarrollado, y el uso del Software SWARM [35] en una PC utilizada como cliente, para la comprobación de los datos transmitidos hacia EARTHWORM.

Para finalizar, se verificó la configuración y operación del DAS a través del sitio Web implementado para tal fin.

El detalle de cada una de las pruebas realizadas y sus resultados se han incluido en la documentación del sistema.

La prueba del Sistema de Adquisición de Datos en un terreno con abundante actividad sísmica durante un período considerable de tiempo ha quedado para una etapa posterior del presente trabajo y no ha podido llevarse a cabo para ser presentado en esta publicación.

VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo plasma el desarrollo de un Sistema de Adquisición de Datos Sísmicos capaz de comunicarse en forma directa al Sistema Colector de Datos EARTHWORM en tiempo real a través de Internet, permitiendo enviar a éste, los datos capturados de un sismómetro (sensor) sin la necesidad y complejidad que conlleva el utilizar un Servidor que haga las veces de intermediario, como sucede al adquirir de terceros, un DAS de prestaciones similares.

Durante del proceso de desarrollo se utilizaron prácticas de Ingeniería de Software, como requerimientos, diseño por etapas y verificación, poniendo de manifiesto la utilidad de estas técnicas en el desarrollo de Sistemas Embebidos. De igual forma, hay un alto grado de contenido en este trabajo de técnicas de procesamiento de señales, para el tratamiento de la señal sísmica en varias de las etapas que conforman el Sistema.

El Sistema de Adquisición logrado hace uso del difundido protocolo en sismología para el intercambio de datos SEEDLINK, lo que permite su integración a cualquier red sísmológica.

La configuración y operación del DAS a través de una interfaz Web, da la posibilidad de utilizar el mismo en lugares de difícil acceso, como los que normalmente se encuentran las Estaciones Sismológicas.

Tras los resultados obtenidos en laboratorio, queda expuesto, en principio, que es viable encarar el desarrollo de un Sistema, como el presentado en esta publicación, para instituciones como INPRES, logrando flexibilidad, conexasión e independencia de terceros.

REFERENCIAS

- [1] Bolt, B. "Earthquakes and geological discovery". Scientific American Library. W.H. Freeman & Co, 221 p. New York, USA. 1993.
- [2] EarthWorm Central. Instrumental Software Technologies, Inc. <http://www.earthwormcentral.org/> [Consulta: Enero de 2014]
- [3] Andres Heinloo. "Networked Seismographs: GEOFON Real-Time Data Distribution (SEEDLINK)". Orfeus Newsletter, Volumen 2 N° 3, Diciembre 2000. <http://www.orfeus-eu.org/organization/Organizatiion/Newsletter/vol2no3/geofon.html> [Consulta: Febrero de 2014]
- [4] Raspberry Pi Foundation. University of Cambridge's Computer Laboratory, 2014. <http://www.raspberrypi.org/> [Consulta: Marzo de 2014]
- [5] Raspbian Operating System. Developers: Mike Thompson and Peter Green. <http://www.raspbian.org/> [Consulta: Marzo de 2014]
- [6] SeisComP. Seismological Software. GEOFON Program. <http://www.seiscomp3.org/> [Consulta: Marzo de 2014]
- [7] "Serial Peripheral Interface (SPI) & Inter-IC (IC2) (SPI_I2C) Application Note" - Renesas, 2003. http://documentation.renesas.com/doc/products/region/rtas/mpumcu/apn/spi_i2c.pdf [Consulta: Abril de 2014]
- [8] "Operation and Maintenance Manual Portable Short-Period Seismometer, Model S-13". Teledyne Geotech, 1983.
- [9] Analog Devices AD622ANZ Data Sheet. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD622.pdf [Consulta: Marzo de 2014]
- [10] Jens Havskov and Gerardo Alguacil. "Instrumentation In Earthquake Seismology". 1st ed. Springer. Netherlands. 2004.
- [11] Texas Instruments ADS8507 Data Sheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8507.pdf> [Consulta: Marzo de 2014]
- [12] Protocolo de Comunicaciones DATALINK - Chad Trabant, IRIS Data Management Center, 2013. <https://seiscode.iris.washington.edu/svn/orb2ringserver/tags/release-1.0/libdali/doc/DataLink.protocol> [Consulta: Febrero de 2014]
- [13] LIBDALI, DataLink Client Library. Chad Trabant, IRIS Data Management Center, 2013. <http://www.iris.edu/pub/programs/ringserver/libdali-1.6.tar.gz> [Consulta: Febrero de 2014]
- [14] Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) "SEED Reference Manual". 3rd ed. 2006. Appendix G - Data Only SEED Volumes (Mini-SEED).
- [15] LIBMSEED, The Mini-SEED library. Chad Trabant, IRIS Data Management Center, 2013. <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/libmseed> [Consulta: Febrero de 2014]
- [16] RINGSERVER, A generic ring buffer and a SeedLink Server - Chad Trabant, IRIS Data Management Center, 2013. <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/ringserver/> [Consulta: Febrero de 2014]
- [17] Parámetro establecido por el Departamento Laboratorio Sismológico del INPRES.
- [18] Milton Kaufman y Arthur H. Seidman. "Manual para Ingenieros y Técnicos en Electrónica". 2da ed. McGraw-Hill. 1992.
- [19] Ashok Ambardar. "Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales". 2da ed. Thomson Learning. 2002.
- [20] Bonnie C. Baker. "Anti-Aliasing, Analog Filters for Data Acquisition Systems". Application Note 699. Microchip Technology Inc. 1999.
- [21] Analog Filter Design (AFD) Toolbox – James Squire. MATLAB Central, 2012. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9458-analog-filter-design-toolbox> [Consulta: Julio 2014]
- [22] Valores registrados por el Departamento Laboratorio Sismológico, en base a al registro de sismos locales con epicentro a una distancia de 100 km de la ubicación del sismómetro.
- [23] Steven W. Smith. "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing". 2nd ed. Analog Devices. California Technical Publishing. San Diego, California, USA. 1999.
- [24] Enrique Bueno Gimeno. "Diseño de un Convertidor Analógico-Digital de Aproximaciones Sucesivas de bajo consumo y área reducida". Proyecto de Fin de Carrera. Austriamicrosystems AG. Universidad Politécnica de Valencia. 2010.
- [25] Texas Instruments LM324 Data Sheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf> [Consulta: Agosto 2014]
- [26] Wiring Pi. GPIO Interface library for the Raspberry Pi. <http://wiringpi.com/> [Consulta: Marzo de 2014]
- [27] W. Richard Stevens, Stephen A. Rago. "Advanced Programming in the UNIX Environment". 2nd ed. Addison Wesley Professional. 2005.
- [28] Shu-Fang Newman. "Seismographic Data Compression". Institute of Technology, University of Washington, Tacoma. 2006.

- [29] Valor establecido de acuerdo al formato de compresión utilizado y a la frecuencia de muestreo escogida, según recomendación de Chad Trabant (Autor de la librería LIBMSEED).
- [30] Emmanuel C. Ifeachor and Barrie W. Jervis . "Digital Signal Processing: A Practical Approach". 1st ed. Addison-Wesley Publishing Company. USA. 1993.
- [31] Filter Design and Analysis Tool (FDATool). MATLAB Documentation, 2014.
<http://www.mathworks.com/help/signal/ug/overview.html#br179zi-4>
[Consulta: Agosto de 2014].
- [32] PHP Official Web Site.
<http://php.net/> [Consulta: Mayo de 2014]
- [33] Apache. HTTP Server Project.
<http://httpd.apache.org/> [Consulta: Mayo de 2014]
- [34] Dispositivo de Adquisición de Datos (DAQ) NI-USB-6009. National Instruments.
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201987> [Consulta: Noviembre de 2014]
- [35] SWARM. Seismic Wave Analysis and Real-time Monitoring. Peter Cervelli, United States Geological Survey (USGS), 2014.
<http://volcanoes.usgs.gov/software/swarm/index.php> [Consulta: Mayo de 2014]
- [36] Parámetro establecido por el Departamento Laboratorio Sismológico del INPRES para la verificación de cada uno de sus Sistemas de Adquisición de Datos.