

ELECTRÓNICA NO LINEAL
INFORME

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL DE AUDIO PARA MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB-6211

R. Ardila, Jessica Paola
rodriguez.jessica@javeriana.edu.co
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C.

Resumen— El objetivo principal del trabajo descrito en el presente documento es diseñar la etapa de acondicionamiento de una señal de audio generada por el micrófono BL-21994-000 del fabricante Knowles. Una vez implementada la etapa de acondicionamiento, se espera que se obtengan unos parámetros de calidad mayores a 74 dB de relación señal a ruido, correspondientes a aproximadamente 12 bits efectivos.

Con dicho propósito se empleará una etapa de preamplificación de la señal y un filtro pasa bajos de cuarto orden tipo Butterworth en configuración Sallen Key contando, además, con un módulo de adquisición de datos NI USB-6211 que permite hacer uso un conversor análogo-digital de 16 bits para el análisis de las señales obtenidas.

Palabras Claves— micrófono, amplificación, pre acondicionamiento, ruido, blindaje, componentes, especificaciones, rango dinámico, SINAD, ENOB, adquisición, módulo, filtro.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de conversores análogo-digitales, así como digital-análogos, ha venido popularizándose debido a su bajo costo, así como a la facilidad de realizar análisis de

señales del mundo físico en interfaz digital, sin requerir la circuitería analógica –de mayor costo- que garantice alta precisión.

Sin embargo, para garantizar la fiabilidad de la información contenida en las señales muestreadas por los módulos de adquisición y luego analizadas digitalmente, es necesario realizar un tratamiento analógico de la señal del mundo físico que garantice que se cumplan requerimientos como los establecidos por el criterio de Nyquist. Esta etapa analógica tiene altos requerimientos de precisión, rechazo a ruido y velocidad por lo que no corresponde a implementaciones triviales desde el punto de vista de hardware.

Este documento se concentra, por consiguiente, en el diseño e implementación de la etapa de acondicionamiento analógico de una señal de audio para su posterior procesamiento digital.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Conversor análogo-digital

Un conversor análogo-digital (ADC) es un dispositivo que permite convertir una señal analógica; es decir, en tiempo continuo, a una señal – o “palabra”- digital; es decir, en tiempo discreto o muestreada.

La señal analógica es aplicada al conversor y esta es muestreada a una tasa determinada tomando medidas de la amplitud de la señal, aproximando cada una de estas a uno de los valores enteros de cuantificación determinados por el número de bits del conversor y el voltaje de referencia.

El error que se desprende de la aproximación de los voltajes analógicos (con infinitos valores) a voltajes digitales o códigos (dentro de un conjunto finito de valores) se denomina *error de cuantización* y se relaciona directamente con el valor del piso de ruido teórico obtenido luego de la conversión análogo-digital. Adicionalmente, factores externos al proceso de conversión como el ruido de la línea, el de inducción y radiación, el producido por los componentes pasivos y activos y factores de montaje como los layouts y el cableado pueden contribuir a incrementar el nivel de ruido.

Las señales de interés del mundo real a ser convertidas pueden tener características diferentes en aspectos tales como amplitud, rango de frecuencia de interés, offset, entre otros. Por esta razón, es indispensable para el diseño de la etapa de acondicionamiento, partir de estas especificaciones de manera que esta etapa no sólo mantenga las características propias de la señal sino que las haga coincidir con las especificaciones de entrada del módulo de adquisición.

2.2. Módulo de adquisición NI USB-6211

El NI USB-6211 fabricado por National Instruments es un módulo de adquisición de datos de 16 bits efectivos con 16 entradas analógicas, 2 salidas analógicas, 4 entradas digitales, 4 salidas digitales y 2 contadores de 32 bits. Tiene una velocidad de muestreo máxima de 250 kS/s y es alimentado a través de USB. Ofrece una fuente de alimentación de 5 V y GND. Tiene fácil

interfaz de conexión con el software LabVIEW y SignalExpress.

2.3 Efecto de aliasing

En el proceso de muestreo de señales analógicas se tienen como características principales la frecuencia propia de la señal a muestrear (f_a) y la frecuencia de muestreo de la adquisición de datos (f_s). Cuando esta última es muy baja –menor o igual al doble de f_a – al pretender reconstruir la señal inicial las componentes de frecuencia de muestreo interfieren con el proceso y hacen que se pierdan los datos, este efecto es conocido como aliasing.

Para evitar que estos efectos se presenten como consecuencia del empleo de una frecuencia de muestreo incorrecta, se debe cumplir con el criterio de muestreo de Nyquist; a saber, la frecuencia de muestreo para la adquisición de los datos debe ser de al menos el doble de la frecuencia de corte de la señal a muestrear.

$$f_s > 2f_a$$

2.4 Filtro antialiasing

En muchos casos la selección de una frecuencia de muestreo que cumpla con el criterio de Nyquist, de acuerdo con lo expuesto anteriormente, no es suficiente para evitar la distorsión y pérdida de datos en la señal de interés por efecto de aliasing. Esto se debe a que las señales en el mundo real contienen componentes que superan el rango de interés de tratamiento de la señal. En el caso del audio, por ejemplo, el rango audible se encuentra entre 20 Hz y 20 kHz pero por encima de dicha frecuencia se existen componentes que, a pesar de no ser escuchados por el humano, sí pueden afectar la correcta reconstrucción de las señales.

Por esta razón, es necesario construir un filtro pasa bajos –o pasa banda en algunos casos- que permita atenuar los componentes en frecuencias fuera del rango de interés. En este caso, se limitará el rango de frecuencias a 4 kHz.

La implementación de este filtro, además, ayuda a reducir el nivel de ruido de la señal adquirida digitalmente puesto que, en caso de no ser empleado, una parte de las componentes de frecuencias superiores se reflejaría luego del muestreo y resultaría en distorsión y ruido adicional.

2.5 Relación señal a ruido y bits efectivos

La relación señal a ruido (S/N) se entiende como la diferencia entre el nivel de la señal (0 dB) y el nivel de ruido. La S/N se obtiene calculando la diferencia entre el nivel de la señal cuando el aparato funciona a nivel nominal de trabajo y el nivel de ruido cuando, a ese mismo nivel de trabajo, no se introduce señal. La calidad de los equipos se mide, entre otros parámetros, por la relación señal a ruido siendo ésta proporcional a la calidad del mismo.

Esta medida da paso también a una cantidad muy empleada en las pruebas para conversores denominada SINAD (Signal to noise and distorsion), aportada directamente en el análisis de distorsión en software como SignalExpress, y a través de la cual se puede encontrar el número de bits efectivos ENOB, aplicando la siguiente fórmula:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02}$$

2.6 Filtro Butterworth

El filtro Butterworth es una de las configuraciones más básicas de filtros y es una aplicación en la cual se pretende tener la respuesta más plana posible en la banda

de paso, reduciendo el *ripple* lo más posible hasta la frecuencia de corte –donde la amplitud de la señal se reduce en 3 dB-. A partir de allí, la amplitud de la señal disminuye a razón de 20 dB por década por número de polos del filtro. De esta forma, un filtro de orden 4, tendrá 4 polos por lo que la pendiente en la banda de atenuación será de 80 dB por década.

El filtro Butterworth es el único filtro que mantiene la forma de su respuesta aún para órdenes mayores, modificando únicamente la pendiente de caída en la banda de atenuación. A diferencia del filtro de Chebyshev que sacrifica la especificación de ripple por un roll-off mayor sin necesidad de incrementar el orden del filtro, para un filtro Butterworth se requiere un alto orden para lograr desempeños en roll-off similares a los filtros Chebyshev o elípticos.

III. PLANTEAMIENTO

El circuito de acondicionamiento planteado para el análisis de señales de audio será alimentado con la fuente de 5 V y GND disponible en el módulo de adquisición NI USB-6211. Teniendo esto en cuenta se diseña un sistema de acondicionamiento que comprende una etapa de filtrado antialiasing y una etapa de preamplificación.

3.1 Preamplificación

Dado que se realizará una simulación de la salida del micrófono Knowles BL-21994-000, cuya amplitud de salida es cercana a los 40 mV, a partir de una señal generada en el mismo módulo de adquisición, se debe garantizar que la señal generada sea lo más limpia posible de manera que pueda ser de una calidad similar a la que se obtendría del micrófono. Por ello, se prefiere generar

inicialmente una señal de amplitud alta de forma que el ruido y el error de conversión no sea considerable.

Al elegir una amplitud de 9 V se debe establecer como primer etapa analógica un divisor de voltaje que, a partir de 9 Vp de entrada obtenga 40 mVp, tal como se muestra en la Figura 1.

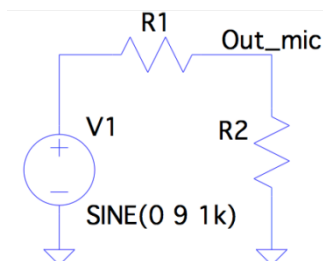


Figura 1. Divisor de voltaje con entrada 9 V

$$40 \text{ mV} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 9 \text{ V}$$

$$\text{con } R_2 = 220 \Omega$$

$$R_1 = 49.28 \text{ k}\Omega$$

para valores comerciales

$$R_1 = 47 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega = 49.2 \text{ k}\Omega$$

Realizando la simulación con estos valores empleando la herramienta LTSpice para observar el comportamiento AC de la señal, se obtiene lo mostrado en la Figura 2.

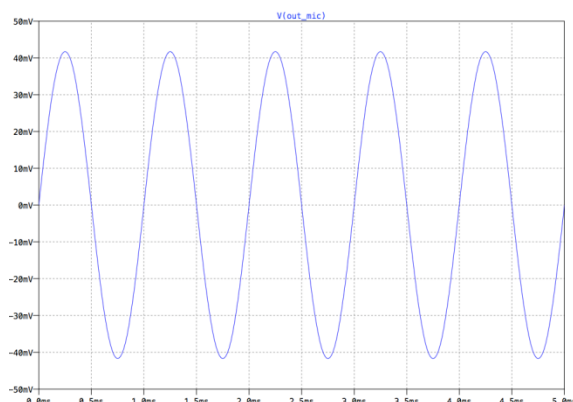


Figura 2. Simulación divisor de voltaje con entrada 9 V salida 40 mV.

Como se puede observar en la figura anterior, la señal obtenida es de aproximadamente 40 mVp centrada en cero. Sin embargo, dado que el circuito será single-supply (alimentado con la fuente 5 V y GND del módulo de adquisición), se requiere que la señal no esté centrada en cero sino que tenga un offset que impida que al ser operada por el amplificador sea recortada en su paso por 0 V. Este offset ha sido calculado para ser aproximadamente igual a la amplitud de salida; 40 mV. Para obtener dicho valor DC se plantea un circuito como el mostrado en la Figura 3.

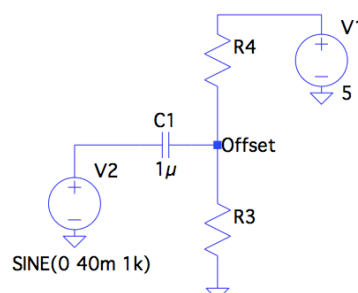


Figura 3. Adición de offset.

$$40 \text{ mV} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot 5 \text{ V}$$

$$\text{con } R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 124 \text{ k}\Omega$$

para valores comerciales

$$R_4 = 120 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega = 123.9 \text{ k}\Omega$$

Realizando la simulación con estos valores para encontrar el punto de operación DC así como el comportamiento AC, se obtiene lo mostrado en la Figura 4.

Pontificia Universidad Javeriana. Rodríguez Ardila Jessica. Acondicionamiento de señal de audio para módulo de adquisición de datos NI USB-6211.

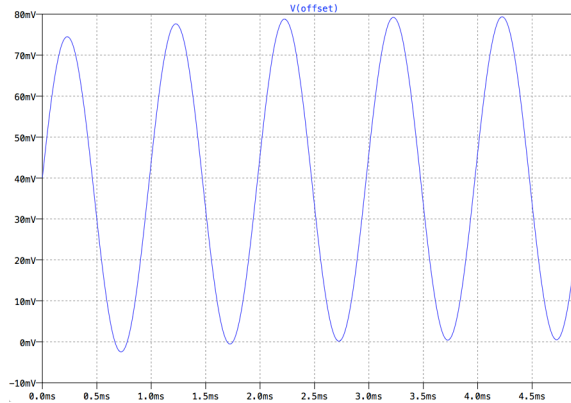


Figura 4. Simulación señal con amplitud 40 mV y offset 40 mV.

La transición al inicio de la señal en la que la amplitud es menor y se tiene un paso por 0 V se debe al valor de C1 -1 uF- dado que éste establece una constante de tiempo baja. En este sentido, para tratar de tener una menor distorsión es posible que se requiera incluir un valor mayor de C1 en el circuito.

Una vez obtenida la señal de 40 mV de amplitud y 40 mV de offset, aproximadamente, se hará pasar por un amplificador no inversor que permita obtener una amplitud de aproximadamente 2 V. Se necesita, entonces, una configuración amplificadora no inversora con ganancia de 50, tal como se muestra en la Figura 5.

$$G = \frac{2 \text{ V}}{0.04 \text{ V}} = 50 \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

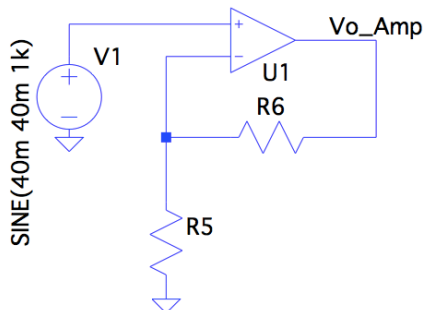


Figura 5. Amplificador operacional no inversor.

$$\frac{V_{O_{Amp}}}{V_1} = 1 + \frac{R_6}{R_5}$$

$$\frac{2 \text{ V}}{40 \text{ mV}} = 50 = 1 + \frac{R_6}{R_5}$$

con $R_6 = 10 \text{ k}\Omega$
 $R_5 = 204.082 \Omega$
 para valores comerciales
 $R_5 = 220 \Omega$ entonces $A = 46.45$

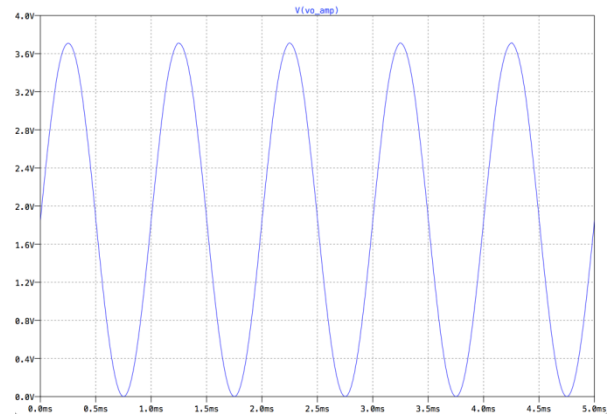


Figura 6. Simulación salida amplificador operacional con ganancia 46.45

El circuito completo de preamplificación, simulado para encontrar el punto de operación DC y el comportamiento AC transiente se muestra en las Figuras 7 y 8.

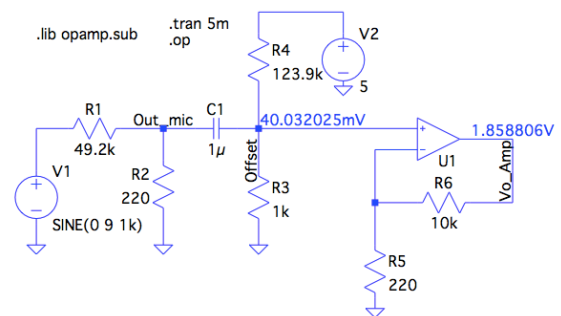


Figura 7. Circuito completo preamplificación.

Pontificia Universidad Javeriana. Rodríguez Ardila Jessica. Acondicionamiento de señal de audio para módulo de adquisición de datos NI USB-6211.

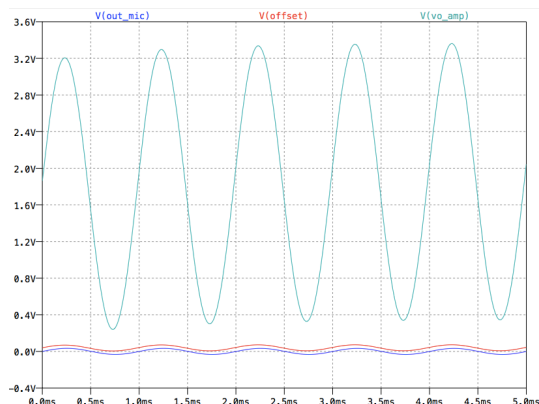


Figura 8. Simulación AC transiente para señal de micrófono, señal con offset, señal amplificada.

3.2 Filtro antialiasing

De acuerdo con las especificaciones solicitadas para el diseño del circuito se empleó un filtro tipo Butterworth de cuarto orden con frecuencia de corte de 4 kHz. Se seleccionó la configuración de Sallen Key teniendo en cuenta que la ganancia en esta configuración no se ve afectada por los valores de los componentes empleados y, además, porque aún siendo una configuración sencilla, permite mover fácilmente los polos.

El filtro requerido es construido mediante el uso de la herramienta de diseño de filtros Filter Pro ofrecida por el fabricante Texas Instruments y es mostrado en la Figura 9.

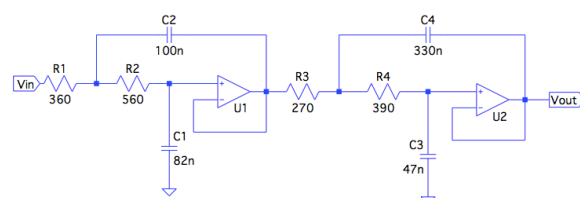


Figura 9. Filtro pasa bajos Butterworth (Sallen Key) de cuarto orden con $f_c=4$ kHz.

Las especificaciones dadas por Filter Pro para cada etapa del filtro diseñado se muestran en la siguiente Tabla.

Name: Lowpass, Sallen Key, Butterworth	
Passband Frequency: 4 kHz	
Corner Frequency Attenuation: -3 dB	
Number of Stages: 2	
Filter Stage: 1	Filter Stage: 2
Quality Factor (Q): 0,54	Quality Factor (Q): 1,31

Tabla 1. Especificaciones de filtro en Filter Pro.

3.3 Selección de componentes

Una vez determinados los cálculos de las etapas requeridas para el acondicionamiento de las señales debe tenerse en cuenta que gran parte de los aspectos que influyen en la relación señal a ruido tienen que ver con las especificaciones y construcción de los componentes y su montaje. Por esta razón, es indispensable que al momento de emplear un circuito integrado, así como componentes pasivos, se garantice que tengan las especificaciones pertinentes para la aplicación deseada.

3.3.1 Amplificador operacional

Teniendo en cuenta que se desea aumentar al máximo posible el SINAD y, por consiguiente el número de bits efectivos que puedan lograrse con el módulo de adquisición, para la selección del circuito integrado de amplificadores operacionales deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros:

- *Drop-out*: Es importante que el amplificador seleccionado sea de característica “rail-to-rail” de manera que no se sature con la ganancia ya determinada.
- Bajo offset: Teniendo un offset de entrada se puede llegar a tener una distorsión apreciable de la señal, lo que influiría directamente en la relación señal a ruido.
- Voltaje de alimentación correspondiente con los valores entregados por el módulo NI USB-6211.

- Bajo consumo: dado que por ser el módulo de adquisición la fuente de alimentación del circuito deben cumplirse los requerimientos de consumo de la fuente disponible en dicho equipo.

Al analizar todo lo mencionado anteriormente se decidió emplear el circuito integrado TLV 2474, con cuatro canales disponibles –suficientes para etapa de preamplificación y filtrado- y producto ganancia ancho de banda de 2.8 MHz. Las especificaciones principales del IC se muestran en la Tabla 2.

Parámetro	Valor
Single Supply	2.7 a 6.0 V
Rail to rail output	
Gain Bandwidth Product	2.8 MHz
Slew Rate	1.4 V/ μ s
Input Noise Voltage	15 nV/ \sqrt{Hz}
THD + N	0.02%

Tabla 2. Especificaciones del TLV 2474.

3.3.2 Resistencias

Dado que el consumo de potencia que se presentará en el circuito es bajo, la característica de disipación de las resistencias no es un factor determinante en la selección de estos componentes. Asimismo, se sabe que no se requieren mucha precisión en los voltajes fijados, de manera que el empleo de resistencias de precisión no es necesario para esta aplicación. Sin embargo, se emplearán resistencias con tolerancia de 5%.

Se tuvo en cuenta durante el diseño de todo el circuito de acondicionamiento que es inconveniente el uso de resistencias de bajo valor ohmico puesto que su resistencia puede llegar a ser comparable con la aportada con el proto board modificando los valores esperados. De igual forma, tampoco se emplearon resistencias de muy alto valor debido al ruido térmico.

3.3.3 Condensadores

Los condensadores más adecuados para la implementación del filtro antialiasing podrían ser los condensadores de policarbonado debido a que aportan poco ruido y mayor estabilidad que los de otros materiales. Sin embargo, este tipo de condensadores no se encuentran actualmente en el mercado por lo que se emplearán condensadores de poliester que coinciden con las necesidades de estabilidad y ruido.

Adicionalmente, para el desacople de las fuentes en la polarización del circuito se situaran condensadores cerámicos o de tantalio del orden de los nano Faradios, debido a su baja inductancia en serie, para que actúen a frecuencias altas, y electrolíticos del orden de los micro Faradios para que desacoplen en frecuencias bajas.

IV. DESARROLLO

El procedimiento que será empleado para hacer las pruebas con el circuito de acondicionamiento de señal de audio se hará con el uso de la herramienta Signal Express de LabVIEW.

Sin embargo, el primer paso a llevar a cabo es la prueba del circuito de pre amplificación y el correcto funcionamiento del filtro. Para el circuito de amplificación se midieron con el DVM los valores DC en la salida del amplificador y no las etapas anteriores, teniendo en cuenta que los efectos de carga del instrumento, por ser valores de voltaje pequeños, podían modificar notablemente los valores esperados. El valor obtenido en la salida del amplificador calculado fue de 1.86 V(DC) y en la medición se obtuvo una medida de 1.8347 V(DC)

Pontificia Universidad Javeriana. Rodríguez Ardila Jessica. Acondicionamiento de señal de audio para módulo de adquisición de datos NI USB-6211.

Una vez verificada la funcionalidad del circuito preamplificador, se procedió a hacer una prueba del funcionamiento del filtro anti-aliasing montado según Filter Pro. Para ello se aplicó una señal de 5 Vpp desde el generador de funciones de un osciloscopio Agilent haciendo un cambio de frecuencia y observando la amplitud de la señal para poder verificar una frecuencia de corte de 4 kHz. El diagrama de BODE realizado a partir de las observaciones en las pruebas del filtro puede verse en la Figura 10.

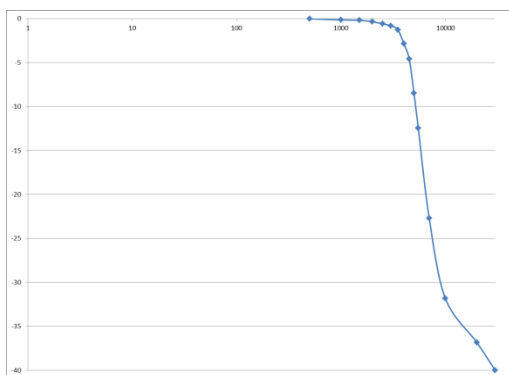


Figura 10. Diagrama de BODE de filtro anti-aliasing.

Una vez comprobado el funcionamiento del circuito por separado se procede a iniciar el acople del circuito completo (esquemático completo en la última página) con el módulo de adquisición y el software SignalExpress. En primera instancia se debe generar una señal seno digitalmente agregando al programa el bloque de “Create Analog Signal” y “DAQmx Generate” definiendo los parámetros de amplitud, frecuencia de la señal y frecuencia de reconstrucción. Es importante anotar que entre mayor sea la frecuencia con la que se reconstruya la señal AC de salida del módulo, mejor rendimiento tendrá el circuito de acondicionamiento porque se reduce el ruido aportado por el conversor DAC que permite obtener la señal.

Los parámetros con los que se creó y generó la señal se pueden ver en las Figuras 11 y 12.

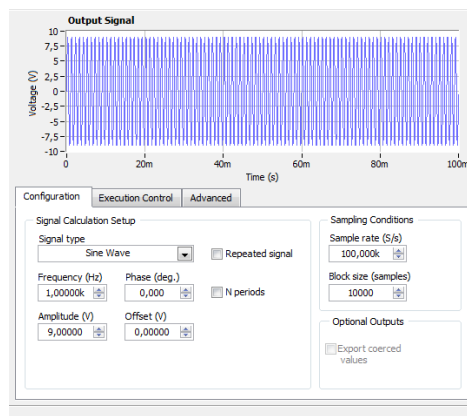


Figura 11. Ventana “Create Signal” para creación de señal seno de 9Vp y frecuencia de 1 kHz

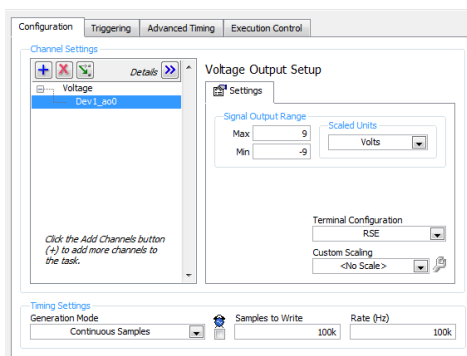


Figura 12. Ventana "Generate Signal" para asignar señal seno a salida analógica AO0

La señal generada puede observarse a su vez, según lo mostrado por el software SignalExpress, en la Figura 13.

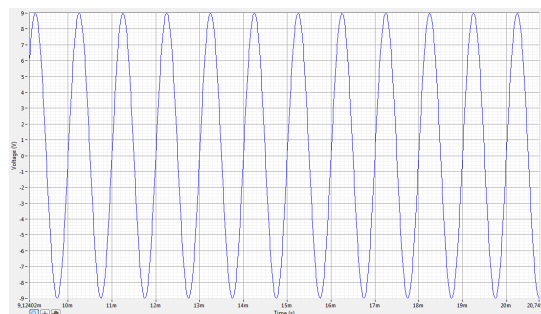


Figura 13. Señal generada por SignalExpress.

Habiendo generado y asignado la señal seno a una de las salidas análogas disponibles en el módulo, el circuito de acondicionamiento es alimentado con la

Pontificia Universidad Javeriana. Rodríguez Ardila Jessica. Acondicionamiento de señal de audio para módulo de adquisición de datos NI USB-6211.

fuente disponible de 5V y GND y la salida AO0 es conectada a la entrada del circuito. Para recibir la salida del filtro en el módulo debe emplearse el bloque “Acquire Signal” especificando el pin asignado a la entrada y el rango de amplitudes a medir. Los parámetros asignados a este bloque pueden verse en la Figura 13.

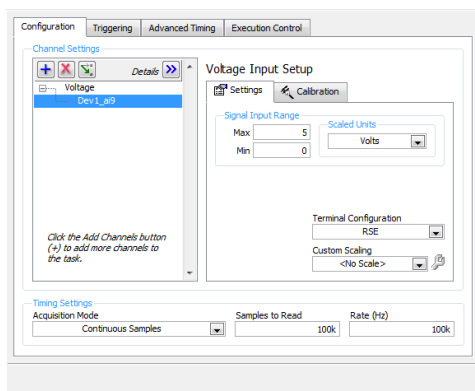


Figura 14. Ventana "Acquire Signal" para definir la adquisición de la señal

La señal adquirida por el módulo de adquisición puede observarse, a su vez, en la Figura 15.

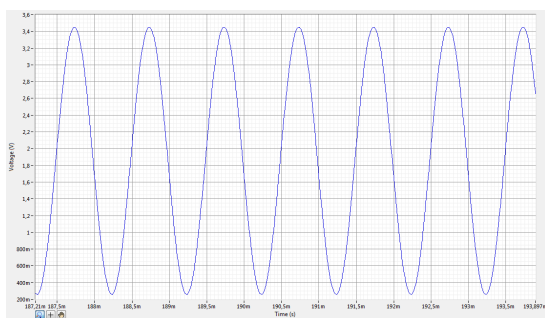


Figura 15. Señal adquirida y visualizada en Signal Express.

4.1 Pruebas de rendimiento del ADC

Inicialmente se realiza una prueba estática del ADC empleando la herramienta “Histograma” dentro del set de “Analysis” en el dominio del tiempo con el fin de observar la distribución probabilística de ocurrencia de los códigos para señal triángulo y señal seno, que se pueden ver en las figuras siguientes.

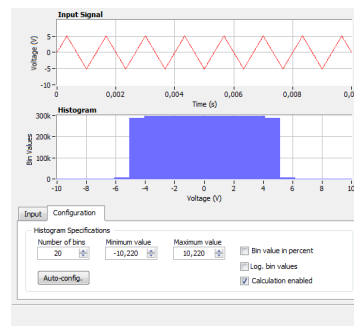


Figura 16. Configuración para obtener histograma con entrada triángulo.

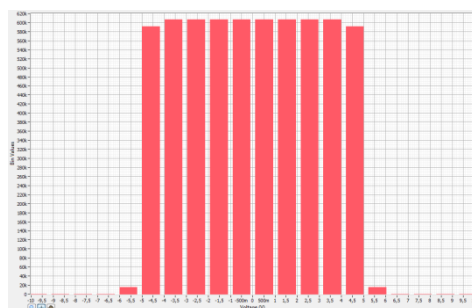


Figura 17. Histograma con entrada triángulo.

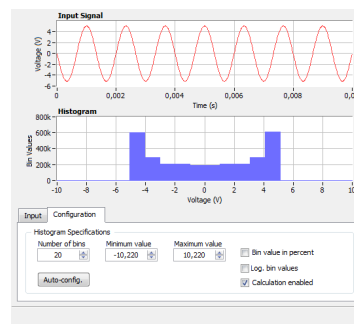


Figura 18. Configuración para histograma con entrada seno.

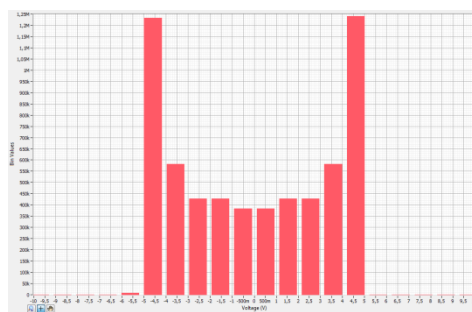


Figura 19. Histograma para entrada seno.

Mediante las imágenes anteriores puede observarse que existe un error de DNL puesto que, para la entrada triángulo, la teoría establece que la probabilidad de ocurrencia de todos los códigos es la misma. Sin embargo puede verse en los extremos de la figura que dos de los códigos tienen menor aparición histórica, lo que implica la existencia de DNL y, por consiguiente, de INL. Este error sin embargo, no es alto, lo que comprueba el buen desempeño del ADC.

La primera prueba dinámica del rendimiento del ADC se realiza empleando la herramienta “Distortion” en la sección de “Analysis”. Usando este bloque puede obtenerse el análisis de FFT que aporta información acerca del porcentaje de distorsión armónica y el SINAD. Al hacer pasar la señal adquirida como entrada, se obtienen los valores mostrados en la Figura.

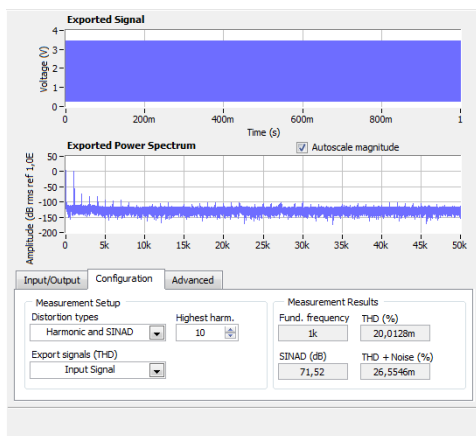


Figura 20. Ventana "Distortion"

Teniendo el valor del SINAD aportado por el análisis del software puede hallarse fácilmente el número de bits efectivos (ENOB) empleando la fórmula enunciada en el marco teórico:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02}$$

$$ENOB = \frac{71.52 - 1.76}{6.02} = 11.5947$$

Por lo tanto, la totalidad de los valores arrojados por el análisis de distorsión realizado pueden observarse en la Tabla.

Parámetro	Valor
SINAD	71,52 dB
ENOB	11,5947
THD (%)	20,0128m
THD + Noise (%)	26,5546m

Tabla 3. Resultados de prueba de distorsión.

Adicionalmente puede observarse el espectro de potencia en el dominio de la frecuencia de la señal para observar de forma más adecuada la relación señal a ruido, el aporte de los armónicos y la atenuación dada por el filtro.

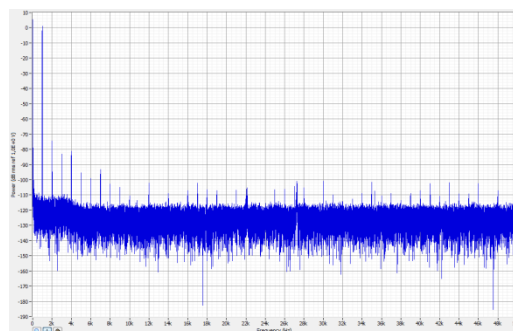


Figura 21. Espectro de potencia de la señal de salida.

V. CONCLUSIONES

- Algo para destacar es que los resultados dependen de la calidad de los equipos que se empleen puesto que al momento de realizar las pruebas, la información adquirida corresponde con aproximaciones de los valores reales y estas aproximaciones dependerán de la resolución, precisión, exactitud y otras características de los equipos que se empleen para realizar estas pruebas.
- Los módulos de adquisición de datos con su software de manipulación son una herramienta muy útil al momento

de realizar este tipo de pruebas porque con ellos se pueden almacenar los datos en un computador para que su análisis sea más eficiente y más verídico. Además de ello, son herramientas que ofrecen análisis de pruebas dinámicas y estáticas que permiten verificar el desempeño del conversor, así como de los circuitos de acondicionamiento.

- En las aplicaciones relacionadas con adquisición de datos para procesamiento de señales en entorno digital se hacen especialmente importantes las especificaciones de los componentes activos y pasivos, relacionados con el ruido, distorsión y estabilidad. Estos parámetros determinarán la calidad de la conversión realizada y se hacen indispensables para hacer un uso adecuado de los adelantos tecnológicos que permiten tener mayor cantidad de bits en la conversión.
- El blindaje de los circuitos es determinante en la relación señal a ruido y la distorsión obtenida después de hacer una conversión de dominio digital a dominio análogo o viceversa. En ese sentido, los aportes por inducción, radiación, ruido de la línea y demás parámetros que en algunas aplicaciones pueden ser despreciados, en esta aplicación específica se hacen preponderantes.
- Pese a ser la tecnología que permite el procesamiento digital de las señales cada vez más barata y sencilla de manejar, el gran desafío en la correcta implementación de éstos es el acoplamiento entre el mundo análogo y el mundo digital que requiere de una gran precisión de los componentes y cálculos, así como de los procedimientos de montaje.

ESQUEMÁTICO COMPLETO