

## Fuentes, Simulación y Análisis de Ruido en Señales Analógicas

Boher Atilio<sup>a</sup>, Melgarejo Marcos Ezequiel<sup>a</sup>, Rojas Juan Gabriel<sup>a</sup>, Anocibar Héctor<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Departamento de Ingeniería Electrónica, Asignatura Mediciones Electrónicas, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>c</sup> GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: atilioboher@gmail.com, marcos100067@gmail.com, juangabrielrojas97@gmail.com, anocibar@gmail.com

---

### Resumen

El presente documento fue realizado como consigna de la asignatura Mediciones Electrónicas de la carrera de Ingeniería Electrónica. El mismo consiste en una investigación acerca de los tipos de ruidos presentes en circuitos electrónicos, esto con el objetivo de la creación de una guía de actividades relacionada al tema, la cual fue destinada a ser realizada en clases por los compañeros pares. Una vez finalizado la investigación inicial se realizaron diferentes experimentos en el laboratorio haciendo uso únicamente de los instrumentos propuestos por los docentes; obteniéndose así, en base a algunas de estas experiencias, una guía de actividades compuesta por tres puntos donde, utilizando un generador de funciones, un circuito sumador y un filtro pasa bajos, se introducen dos señales configuradas en el generador de funciones para simular una señal de interés y una señal de ruido que interfiere con la anterior, y así observar el efecto del filtro sobre el ruido. Los resultados obtenidos a partir de estas actividades muestran tanto el efecto del ruido sobre las señales analógicas, como la importancia del filtrado de los mismos.

*Palabras Clave* – Ruido electrónico, Tipos de ruido, Colores del ruido, Mediciones, Actividad de laboratorio.

## 1. Introducción<sup>1</sup>

### 1.1. Definiciones básicas

#### 1.1.1. Ruido.

Se denomina ruido eléctrico, a todas aquellas señales de interferencias, de origen eléctrico, no deseadas y que están unidas a la señal principal, o útil, de manera que la pueden alterar produciendo efectos que pueden ser perjudiciales.

El ruido puede estar compuesto por una señal perfectamente definida, como también puede ser una señal puramente aleatoria, donde su magnitud y fase no se pueden predecir con exactitud. Las fuentes de ruido aleatorio solo pueden especificarse por medio de una función de densidad de probabilidad.

La función de densidad de probabilidad más común es la normal o gaussiana. En la misma hay un valor medio de amplitud RMS (valor cuadrático medio), que es más probable que ocurra. La probabilidad de que la amplitud RMS del ruido sea mayor o menor que la media disminuye a medida que se aleja del valor medio, formando así una curva en forma de campana que es simétrica alrededor del centro, como se observa en la Fig. 1.

---

<sup>1</sup> La información brindada en esta sección fue obtenida del capítulo 10 de la bibliografía [1], “Op Amps For Everyone”.

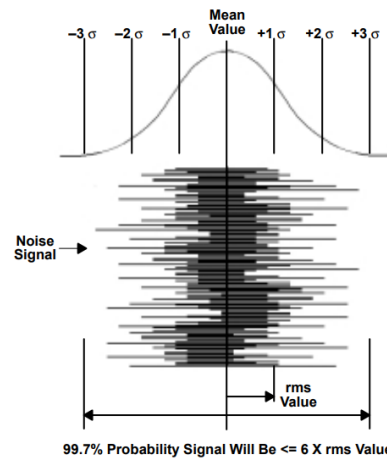


Fig. 1. Distribución normal de ruido.<sup>1</sup>

### 1.1.2. Ruido de piso (floor noise).

Cuando se quitan todas las señales de entrada de un circuito y la salida se termina correctamente, hay un nivel de ruido llamado el ruido de piso que determina la señal más pequeña para la cual el circuito es útil. El objetivo al realizar el diseño es colocar las señales que procesa el circuito por encima del ruido de piso, de tal manera que la señal de salida no se vea afectada por el mismo.

### 1.1.3. Relación señal ruido.

La relación señal/ruido indica el peso que tiene la señal en comparación al ruido que lo afecta y se define de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{S(f)}{N(f)} = \frac{\text{voltaje RMS de Señal}}{\text{voltaje RMS del Ruido}} \quad (1)$$

De otra forma se puede expresar en decibeles cómo:

$$SNR(dB) = 20 \cdot \text{Log} \frac{S(f)}{N(f)} = 20 \cdot \text{Log}(S(f)) - 20 \cdot \text{Log}(N(f)) \quad (2)$$

### 1.1.4. Múltiples fuentes de ruido.

Cuando se cuenta con varias fuentes de ruido en un circuito, el valor RMS total se encuentra tomando la raíz cuadrada de la suma del cuadrado del valor RMS de cada fuente.

$$R_{total} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_n^2} \quad (3)$$

Con lo que, si una señal de ruido es mucho mayor a las demás, esta tenderá a dominar sobre las otras.

### 1.1.5. Unidades del ruido.

Generalmente el ruido es especificado en volts RMS por raíz cuadrada de Hz ( $V/\sqrt{\text{Hz}}$ ), también en su equivalente en corriente ( $A/\sqrt{\text{Hz}}$ ). Por lo tanto, se necesita de un rango de frecuencia para relacionar este valor con la cantidad de ruido total que se observará.

<sup>1</sup> Imagen tomada del capítulo 10 de la bibliografía "Op Amps for Everyone"

### 1.2. Tipos de ruido.

Los tipos de ruidos se listan a continuación.

- Ruido de disparo.
- Ruido térmico.
- Ruido de parpadeo.
- Ruido impulsivo.
- Ruido de avalancha.

Varios de estos ruidos pueden estar presentes en un circuito al mismo tiempo, dando lugar a un espectro de ruido único para el sistema. Generalmente no es posible separar los efectos de cada uno, pero conocer las causas generales puede ayudar a reducir el ruido en el ancho de banda de interés.

### 1.3. Colores de los ruidos.

Generalmente, en un dispositivo pueden presentarse varios tipos de ruidos en la señal de interés, y los mismos son difíciles de separar. Por ello, el ruido se suele clasificar asociando un color a cada tipo, esta asociación de colores está relacionada con la distribución de colores en la representación del espectro de la luz. Esta clasificación se resume en la siguiente tabla.

**Tabla 1. Colores de los ruidos**

Color	Contenido en frecuencia
Púrpura	$f^2$
Azul	$f$
Blanco	1
Rosado	$1/f$
Rojo/Marrón	$1/f^2$

El ruido blanco se encuentra en el medio de un espectro que varía desde púrpura a azul y de rosado a rojo/marrón. Estos colores se corresponden con las potencias a las cuales se encuentran elevadas la frecuencia.

Hay un número infinito de variaciones entre los colores. Todas las potencias inversas de frecuencia son posibles como también las potencias proporcionales, al igual que los ruidos que son de banda estrecha o que aparecen solo en una frecuencia discreta. Sin embargo, estas son principalmente fuentes externas de ruido, por lo que su presencia es una pista importante de que el ruido es externo, no interno. No hay colores puros; en las frecuencias altas, todos ellos comienzan a rodar y se vuelven rosados.

## 2. Barrido de frecuencias y simulación de ruido.

De la investigación realizada, surge como resultado la redacción de una guía de actividades a modo que los demás estudiantes puedan incorporar los mismos conocimientos sobre el análisis de ruidos en circuitos electrónicos. Dicha guía se adjunta en el Apéndice A.

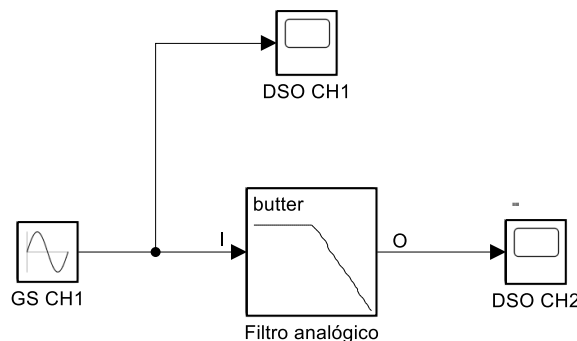
A continuación, se muestra el desarrollo práctico de la misma, analizando los resultados obtenidos.

### 2.1. Caracterización de un filtro desconocido.

#### 2.1.1. Concepto.

La respuesta en frecuencia de un filtro se corresponde con la ganancia o atenuación que presenta una señal de una frecuencia determinada al pasar por el mismo. Es posible caracterizar la respuesta de un filtro a partir de un barrido de frecuencias, manteniendo constante la amplitud de las señales. Al variar la frecuencia de la señal de entrada, se observa que, para un intervalo de frecuencias, dicha señal no presenta cambios en su amplitud, o bien, de presentar una ganancia o atenuación, la misma es constante, este intervalo se denomina Banda de Paso. En los límites de esta banda, la ganancia o atenuación, que antes era constante, cae  $3\text{ dB}$ . Todas las frecuencias más allá de ésta última, componen lo que se denomina Banda de Atenuación, en la cual las señales se ven atenuadas y, por lo tanto, su amplitud a la salida del filtro es menor que en la entrada del mismo.

Para la caracterización de un filtro, se dispone de un generador de señales RIGOL DG1022 (a partir de ahora, GS), un osciloscopio de almacenamiento digital OWON SDS5032E (a partir de ahora, DSO), ambos de 2 canales, y una fuente de alimentación simétrica regulada regulable configurada en  $\pm 12\text{ V}$ . La Fig. 2 muestra el esquema utilizado para la caracterización.



**Fig. 2. Configuración de instrumentos para caracterización del filtro.**

Ambos canales del DSO se encuentran acoplados en AC.

Con el canal 1 del GS apagado, se configura el mismo a modo que genere un barrido de frecuencias con señales senoidales de  $5\text{ V}_{pp}$  desde  $10\text{ Hz}$  a  $10\text{ kHz}$  en  $10\text{ s}$ . Luego, se enciende el canal y se observa en el DSO como se comporta la señal de entrada y salida del filtro en el dominio temporal.

Para observar la respuesta del filtro en el dominio frecuencial, se hace uso de la herramienta matemática FFT del DSO, que realiza la transformada de Fourier de tiempo discreto sobre la forma de onda mostrada en pantalla.

Primero se observa la FFT del canal 1 del DSO (DSO CH1), para confirmar que, en el barrido, la señal mantiene su amplitud constante. Luego, se observa el canal 2 (DSO CH2), para ver cómo, a partir de una frecuencia determinada, la señal de salida comienza a atenuarse. Esta frecuencia corresponde a la frecuencia de corte antes mencionada.

### 2.1.2. Resultados experimentales.

A continuación, se muestran capturas obtenidas del barrido, en las frecuencias  $500\text{ Hz}$ ,  $1\text{ kHz}$  y  $5\text{ kHz}$ .

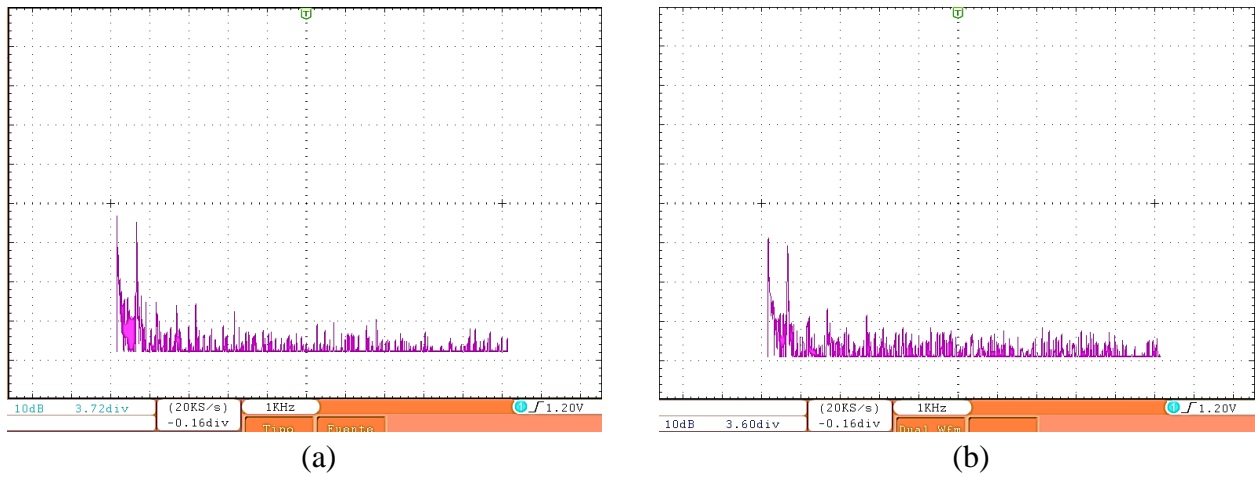


Fig. 3. Respuesta del filtro en 500 Hz. (a) Entrada. (b) Salida.

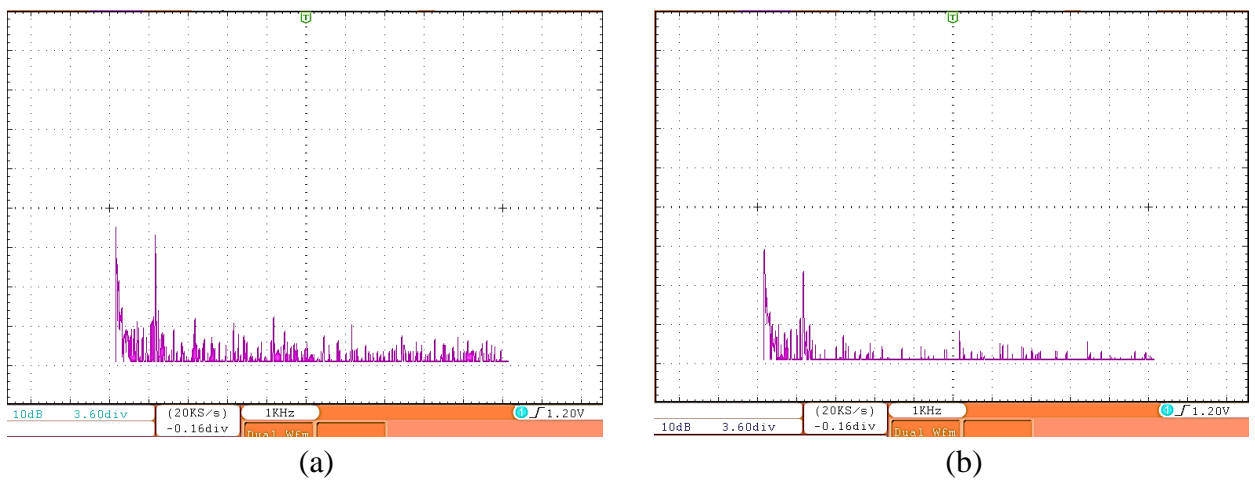


Fig. 4. Respuesta del filtro en 1 kHz. (a) Entrada. (b) Salida.

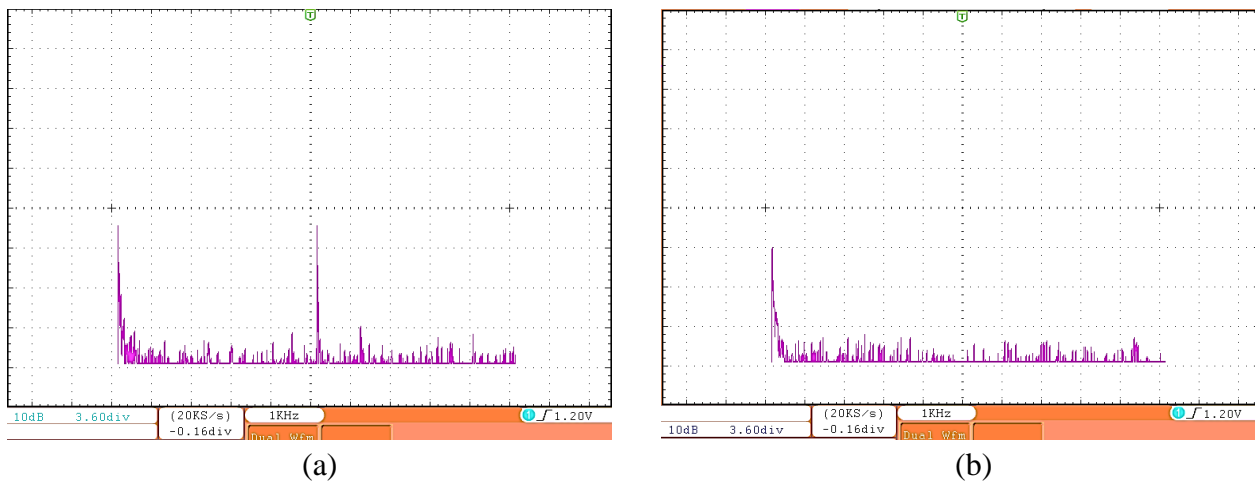


Fig. 5. Respuesta del filtro en 5 kHz. (a) Entrada. (b) Salida.

En cada imagen se observa que la FFT muestra una componente de continua (pico en el límite izquierdo de la respuesta) aun cuando los canales del DSO se acoplan en AC, se atribuye esto a un algoritmo de FFT ineficiente.

Despreciando esto, en 500 Hz no se observa atenuación; en 1 kHz se observa una atenuación leve, y en 5 kHz la señal se atenúa casi completamente (al menos al límite medible con el DSO disponible).

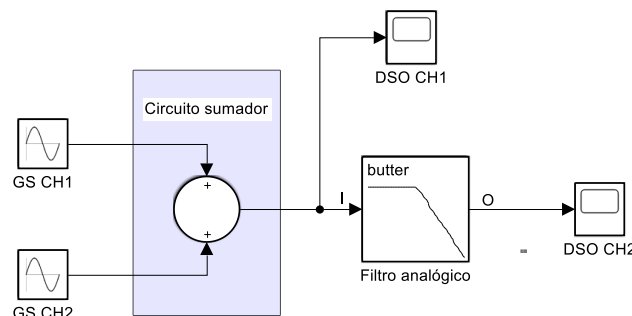
## 2.2. Simulación de ruido de alta frecuencia.

### 2.2.1. Concepto.

Al momento de realizar una medición, conocer el rango de frecuencias dentro de la cual está la señal de interés puede ayudar a eliminar otras fuentes de ruido mediante un circuito de filtrado.

A continuación, se procede a simular una perturbación de una frecuencia determinada, que influye sobre la medición de una señal de interés, que, para este caso, es senoidal pura de 500 Hz, con 5  $V_{pp}$  y sin offset.

Para simular la perturbación, se usa un circuito sumador. La Fig.6 esquematiza el conexionado de los instrumentos utilizados.



**Fig. 6. Esquema de simulación de perturbación.**

Inyectando una senoide de 500 Hz, 5  $V_{pp}$  con el canal 1 del GS, se procede a ver el efecto de sumarle señales de 50 Hz, 1 kHz, 1,5 kHz y 5 kHz, todas de 1  $V_{pp}$ . Estas señales simulan ruido presente al momento de realizar una medición. Luego, se calcula la relación señal/ruido en la entrada y salida del filtro para cada combinación.

### 2.2.2. Resultados experimentales.

#### 2.2.2.1. Simulación de ruido de 50 Hz.

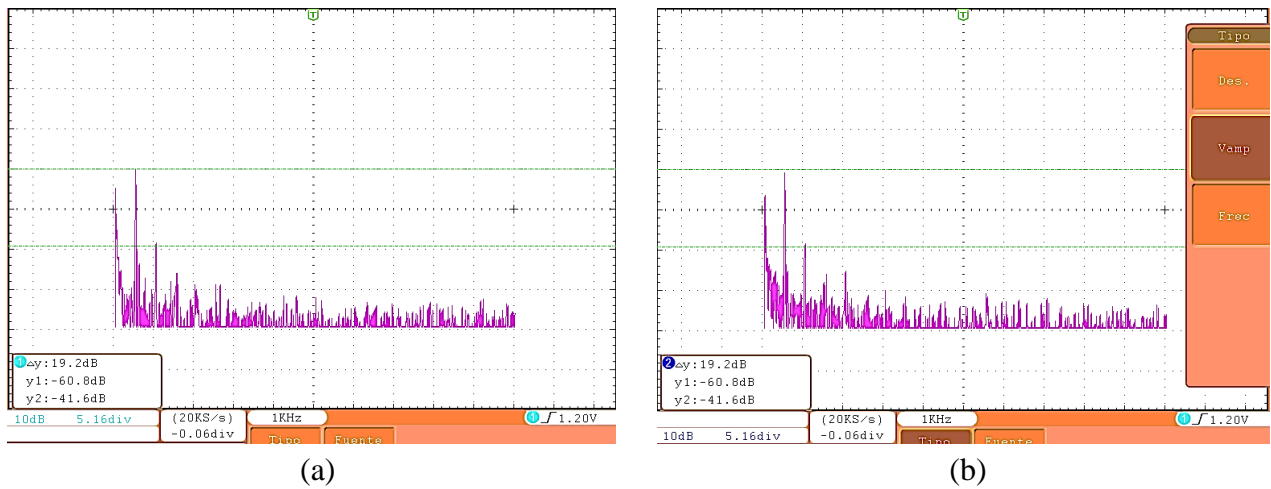


**Fig. 7. Simulación de ruido de 50 Hz. (a) Entrada. (b) Salida.**

$$SNR_{entrada} = -42 \text{ dB} - (-56,4 \text{ dB}) = 14,4 \text{ dB} \quad (4)$$

$$SNR_{salida} = -42 \text{ dB} - (-56,4 \text{ dB}) = 14,4 \text{ dB} \quad (5)$$

### 2.2.2.2. Simulación de ruido de 1 kHz.

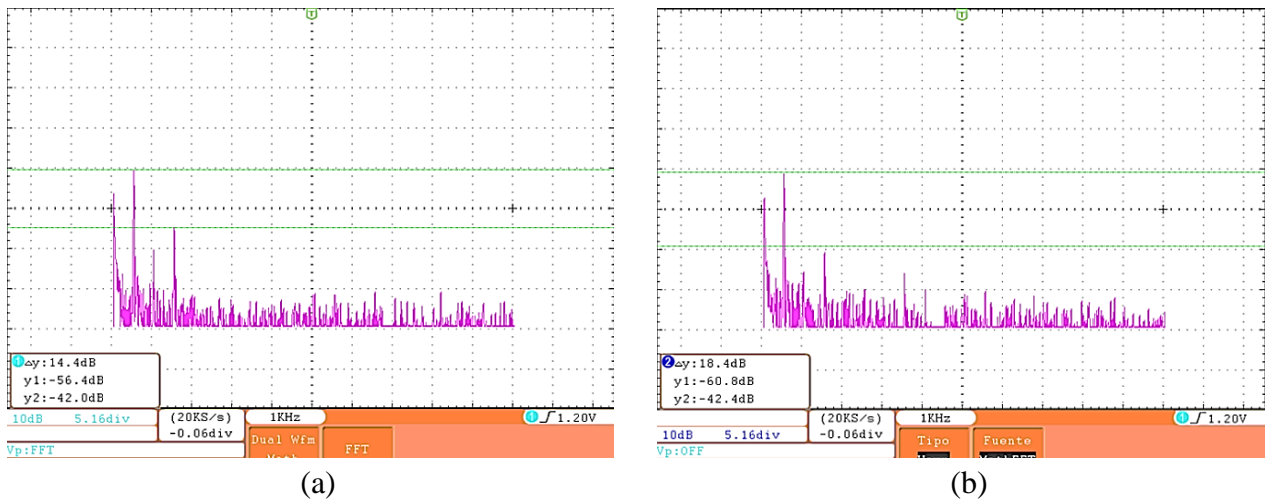


**Fig. 8. Simulación de ruido de 1 kHz. (a) Entrada. (b) Salida.**

$$SNR_{entrada} = -41,6 \text{ dB} - (-60,8 \text{ dB}) = 19,2 \text{ dB} \quad (6)$$

$$SNR_{salida} = -41,6 \text{ dB} - (-60,8 \text{ dB}) = 19,2 \text{ dB} \quad (7)$$

### 2.2.2.3. Simulación de ruido de 1,5 kHz.

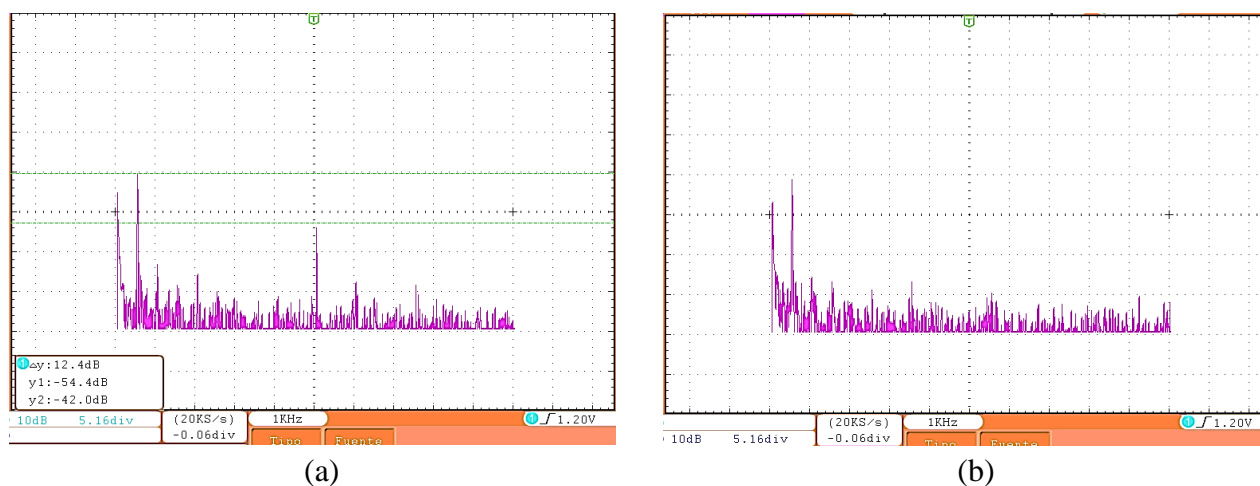


**Fig. 9. Simulación de ruido de 1,5 kHz. (a) Entrada. (b) Salida.**

$$SNR_{entrada} = -42 \text{ dB} - (-56,4 \text{ dB}) = 14,4 \text{ dB} \quad (8)$$

$$SNR_{salida} = -42,4 \text{ dB} - (-60,8 \text{ dB}) = 18,4 \text{ dB} \quad (9)$$

### 2.2.2.4. Simulación de ruido de 5 kHz.



**Fig. 10. Simulación de ruido de 5 kHz. (a) Entrada. (b) Salida.**

En este caso, debido a la limitación de resolución del DSO utilizado, y alta atenuación de la señal de ruido, no se puede obtener un valor de SNR, sin embargo, cualitativamente, se observa que sobrepasa los 20 dB.

## 2.3. Análisis de ruido de amplio espectro.

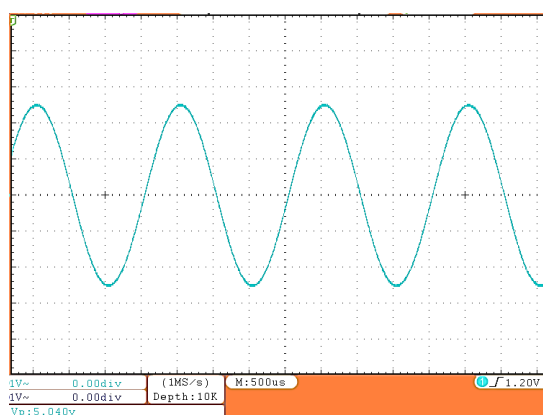
### 2.3.1. Concepto:

Existen ruidos que, a diferencia de los simulados anteriormente, poseen energía en una amplia banda del espectro de frecuencias, lo que hace más difícil el filtrado total de los mismos.

En este caso, se usa la función de generación de ruido del GS, que genera ruido blanco gaussiano, para ver el efecto sobre una señal.

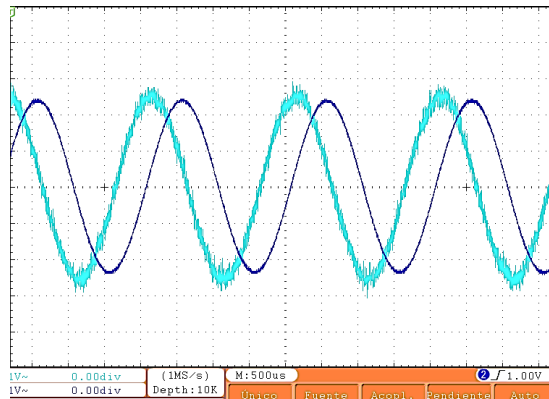
Usando la configuración de la Fig. 6, se inyecta desde el canal 1 del GS una senoide de 500 Hz, 5  $V_{pp}$ , y se registra la forma de onda limpia en la entrada del filtro. Luego, en el canal 2 se genera ruido de 5  $V_{pp}$ . Se observa la entrada y la salida del filtro para observar el efecto del mismo sobre este ruido de amplio espectro.

### 2.3.2. Resultados experimentales



**Fig. 11. Señal senoidal de 500 Hz, sin ruido.**





**Fig. 12. Señal con ruido en la entrada del filtro y señal filtrada a la salida.**

Como se puede observar, gracias al uso del filtro se puede eliminar gran parte del ruido de la señal. Esto se debe principalmente al hecho de que dicho ruido, como se dijo anteriormente, tiene su energía dispersa en el espectro de frecuencias, por lo que, al filtrar gran parte de ese espectro, la energía restante correspondiente al ruido en la señal de salida es muy pequeña como para causar interferencias, al menos al nivel de resolución de los instrumentos disponibles.

### 3. Conclusiones

Luego de realizar las distintas experiencias, se pudo comprobar el efecto de sumar ruido de alta frecuencia sobre la onda senoidal base usada como referencia, y el efecto del filtro utilizado sobre la señal resultante de dicha suma.

Las experiencias sirvieron para enriquecer el conocimiento sobre el funcionamiento de circuitos de filtros y la instrumentación usada para generación de formas de onda arbitrarias (GS), como también la visualización y caracterización de formas de onda tanto en el dominio temporal como en el frecuencial a partir del osciloscopio digital (DSO). Al mismo tiempo, ayudó a familiarizarse con las configuraciones y herramientas incluidas en dichos instrumentos.

En la primera experiencia, se observó que es posible caracterizar un filtro desconocido por medio del GS y la utilidad de FFT del DSO. Esto es aplicable no solamente a filtros, sino que sirve para caracterizar cualquier sistema desconocido que se supone lineal.

En la segunda experiencia, se pudo comprobar el efecto de filtrado del circuito de filtro utilizado, realizando un análisis cualitativo y cuantitativo de la forma de onda obtenida a la salida de dicho circuito, respecto a la inyectada en la entrada. El efecto de filtrado es deseado siempre que la señal de interés se encuentre en la banda de paso del filtro y la señal de ruido en la banda de atenuación. Además, mientras más alejada de la frecuencia de corte se encuentre esta última señal, presentará más atenuación, afectando menos la medición de la señal de interés a la salida del filtro.

En la última experiencia, se analizó el efecto de ruido de amplio espectro, demostrando que si dicho ruido presenta poca energía en la banda de paso del filtro usado, el filtrado se encarga de eliminar dicho ruido casi completamente.

Finalmente, la experiencia global sirvió de ayuda a la comprensión del efecto de los ruidos indeseados sobre circuitos electrónicos, los tipos más importantes que se deben tener en cuenta si se desea el funcionamiento del circuito sin distorsiones, la clasificación de los ruidos por colores, y las posibles estrategias de eliminación de los mismos por medio del uso de filtros.

## Apéndice A. Guía de Actividades “Generador de barrido y ruido con SDS5032E + DG1022 + Filtros”.

### Generador de barrido y ruido con SDS5032E + DG1022 + Filtros:

#### Objetivos:

Identificar, analizar y comparar formas y fuentes de ruido en un circuito electrónico. Identificar el comportamiento de un filtro y el efecto sobre una medición. Analizar estrategias para la eliminación del ruido en una medición.

#### Actividad de laboratorio 1 – Familiarización con el generador de funciones e identificación del filtro:

Una forma rápida de caracterizar un circuito de una entrada y una salida (SISO) es mediante un barrido de frecuencias.

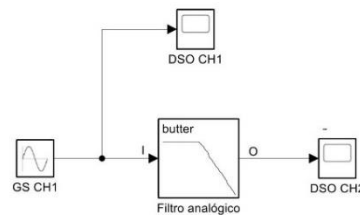


Figura 1 - Configuración actividad 1.




- 1- Disponer el generador de señales DG1022, el DSO SDS5032E y el filtro como se muestra en la Figura 1 (usar una alimentación simétrica de  $\pm 12 V$  para el filtro). El acople del DSO debe ser AC para ambos canales.
- 2- En el generador de funciones (a partir de ahora GF), asegurándose que CH1 se encuentra apagado (la iluminación del botón se encuentra apagada), configurar el barrido de frecuencias con ondas senoidales. Para ello, presionar el botón  y luego configurar la amplitud de la señal a  $5 V_{pp}$  con  $0 V_{offset}$ , luego presionar . En la pantalla se debería ver la siguiente información:



Figura 2 - Pantalla del GS.

- 3- Mantener la primera opción el Linear para realizar un barrido lineal. Configurar la frecuencia inicial (Start) en 10 Hz y la final (Stop) en 10 kHz. El tiempo de barrido debe ser de 10 segundos.
- 4- Activar el CH1 del GS. En la pantalla del DSO debería observar la forma de onda cambiante. Usando el menú  seleccionar **FFT**. Asegurarse que la fuente (Source) sea **CH1**, la ventana (Window) **Hamming** y el formato (Format) **dB**. Usando las perillas de base de tiempo y voltaje, configurar  $1 kHz$  por división horizontal y  $10 dB$  por división vertical.
- 5- Debería observar la transformada de Fourier de la señal de entrada, donde un pico de frecuencia se desplaza de izquierda a derecha, manteniendo su amplitud constante.
- 6- Cambiar la fuente de la **FFT** a **CH2**. En pantalla se debe ver la respuesta del filtro bajo prueba. A partir del cambio en magnitud del pico en movimiento, determinar el tipo de filtro y estimar su frecuencia de corte.

#### Actividad de laboratorio 2 – Simulación de ruido de alta frecuencia.

Al momento de realizar una medición, conocer el rango de frecuencias dentro de la cual está la señal de interés puede ayudar a eliminar otras fuentes de ruido mediante un circuito de filtrado. Para esta experiencia se supone que la señal de interés es una onda senoidal de 500 Hz.

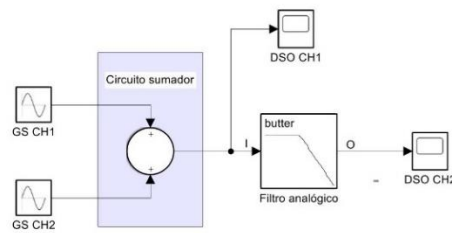


Figura 3 - Configuración Actividad 2.

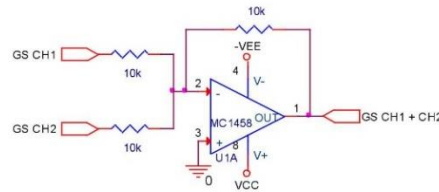



Figura 4 - Circuito sumador.


- 1- Usando las Figuras 3 y 4, armar el circuito sumador (usar la misma alimentación del filtro). Configurar en el **CH1** del GS una onda senoidal pura de 500 Hz,  $5 V_{pp}$  y  $0 V_{offset}$ .
- 2- En el **CH2** del GS, configurar una onda senoidal de 1 kHz,  $1 V_{pp}$  y  $0 V_{offset}$ . Ésta simula una señal de ruido interfiriendo con la medición. Para cambiar entre la configuración de ambos canales, usar .
- 3- Valiéndose de los cursores horizontales, medir en la **FFT** del **CH1** del DSO la amplitud de ambas señales en dB. A partir de estos valores, calcular la relación señal/ruido (Signal to noise ratio).
- 4- Repetir el proceso, midiendo esta vez las amplitudes en la **FFT** del **CH2** del DSO. Comparar con el cálculo anterior.
- 5- Realizar los pasos 2 a 4 con frecuencias de ruido simulado de 50 Hz, 1.5 kHz y 5 kHz. Comparar resultados, analizar y comentar conclusiones. ¿Cómo procedería para filtrar ruido de la red eléctrica?

Recordar que las configuraciones en el GS se hacen con sus salidas apagadas.

### **Actividad de laboratorio 3 – Ruido de amplio espectro.**

Existen ruido de amplio espectro, es decir, sin una frecuencia de afección específica, lo que hace más difícil el filtrado total del mismo. En este caso se usará la función de generación de ruido del GS para ver el efecto de ruido blanco sobre una señal.

Dado que a continuación se deben comparar formas de onda, puede guardar las formas del DSO en formato CSV y luego compararlas usando MatLab.

- 1- Mantener la onda senoidal del punto anterior en **CH1** del generador, apagando **CH2**. Registrar la forma de onda.
- 2- Usar la opción  del **CH2** del generador. Establecer la amplitud del ruido en  $5 V_{pp}$ ,  $0 V_{offset}$ . Encender el canal.
- 3- Observar y registrar las formas en la entrada (**CH1** del DSO) y salida (**CH2** del DSO) del filtro.
- 4- Comentar las diferencias entre ambas.
- 5- ¿Observa alguna diferencia entre la salida del filtro en el punto 3 y la señal registrada en el punto 1? De ser así, ¿A qué se debe? Comentar.
- 6- ¿Se le ocurre alguna forma de filtrar por completo el ruido de amplio espectro?

2

## **Referencias**

- [1] Bruce Carter, Ron Mancini, Op Amps for Everyone. 2003.