

Desarrollo de un Proceso de Medida de Ruido en Sistemas Electrónicos como Actividad Formativa Integradora de Conocimientos

J. Pérez-Bailón, A. Márquez, N. Medrano, B. Calvo

Grupo de Diseño Electrónico- I3A

Universidad de Zaragoza

E-50009 Zaragoza, Spain

{610686, 612620, nmedrano, becalvo}@unizar.es

Abstract— Este trabajo presenta una experiencia práctica de caracterización del ruido de un sistema amplificador como vehículo de integración de conocimientos teórico-prácticos en el marco de la asignatura Instrumentación Inteligente del Máster en Física y Tecnologías Físicas, que permite abordar cuestiones clave en los procesos de medida de la Física experimental actual, facilitando la reflexión del estudiante sobre las consideraciones prácticas de un proceso de medida real.

Keywords— *Ruido; densidad espectral; flicker; FFT; instrumentación electrónica; integración de conocimientos.*

I. INTRODUCCIÓN

Los recientes avances en Física han dado lugar a numerosas aplicaciones tecnológicas ampliamente difundidas. Discos duros de estado sólido, sistemas de comunicaciones móviles, GPS o pantallas de muy alta resolución son, entre otros, productos tecnológicos derivados directamente de resultados experimentales en laboratorios de investigación. Cada vez es más necesario disponer de sistemas de medida de altas prestaciones, que permitan llegar más cerca del límite físico y determinar cambios en el comportamiento de la materia a escalas cada vez menores. Para ello es preciso emplear sensores de alta sensibilidad y resolución y disponer de los sistemas electrónicos adecuados para un correcto procesamiento de las señales: amplificadores de bajo ruido, filtros configurables, sistemas de conversión analógico-digitales de alta resolución o instrumentación capaz de medir en el límite físico, cuya operación pueda ser sincronizada para la correcta interpretación de los fenómenos bajo estudio: los procesos de medida y caracterización experimental que se llevan a cabo en los laboratorios de investigación e industriales requieren en muchas ocasiones el diseño e implementación de sistemas electrónicos de acondicionado ad hoc, el empleo de una instrumentación y protocolo de medida concreto, determinado por factores relacionados con las magnitudes a medir: parámetros físicos bajo estudio, características físico-químicas del proceso, exactitud y precisión de las medidas,

velocidad y frecuencia de las adquisiciones, son algunos de ellos.

Disponer de los conocimientos y capacitación adecuados para abordar todas estas cuestiones es un valor añadido en un currículo científico-técnico, que permite tener una perspectiva general del problema que se pretende abordar: desde los principios físico-químicos del proceso que se monitoriza, bien para obtener modelos precisos, bien para realizar su control, hasta los bloques básicos necesarios para la correcta adquisición de las magnitudes bajo estudio. Con este objetivo se propone en el curso 2015-1016 la asignatura Instrumentación Inteligente en el Máster en Física y Tecnologías Físicas de la Universidad de Zaragoza [1], caracterizada por un carácter transversal y recomendada para aquellos estudiantes que deseen proseguir su actividad profesional o desarrollar su Tesis Doctoral en cualquiera de los ámbitos de la Física Experimental, desempeñando su actividad laboral en laboratorios con medidas físicas, de calibrado y caracterización de materiales y en general aquellos centros en los que se requiera el empleo de sistemas de adquisición y medida. Se plantea como un curso en el que los alumnos se familiarizarán con las técnicas modernas de adquisición y tratamiento de medidas físicas, especialmente aquellas que requieren de instrumentación específica o técnicas de procesamiento y acondicionado tanto analógicas como digitales de alto rendimiento, diseñadas para su aplicación a medidas en el límite físico de resolución.

La actividad final de la asignatura es el diseño y caracterización de un sistema completo de adquisición de medida y control de la instrumentación. Este trabajo presenta la experiencia desarrollada durante este primer curso 2015-2016 en la asignatura Instrumentación Inteligente. En ella se ha propuesto a los estudiantes como actividad experimental final el desarrollo integral de un sistema de medida del ruido de un amplificador dado, de forma que deban aplicar gran parte de los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la asignatura, y comprobar al mismo tiempo algunos de los aspectos cubiertos de forma teórica y que sólo ocasionalmente son verificados experimentalmente: diferencias de operación

This work was supported in part by MINECO-FEDER (TEC2015-65750-R)

entre un sistema estabilizado térmicamente o no, importancia y técnicas de aislamiento de interferencias (sobre todo para medidas de muy bajo nivel), efectos del promediado de medidas, consecuencias de una resolución incorrecta, etc. Los estudiantes son responsables del diseño del sistema de medida, programación de instrumentos, adquisición de datos y tratamiento, para dar finalmente una figura de ruido de entrada contrastable con la proporcionada por el fabricante del dispositivo bajo estudio.

Este artículo se estructura de la siguiente forma. En la Sección 2 se describe brevemente el contexto de la asignatura objeto de este trabajo dentro del Máster en la que se oferta. En la Sección 3 se presenta la propuesta experimental, justificando la importancia de la medida del ruido para procesado de señales de muy bajo nivel, así como todo el proceso experimental y de adquisición y tratamiento de datos, presentando gráficamente los resultados obtenidos en la experiencia. La Sección 4 discute algunos puntos clave en el desarrollo de este trabajo, y finalmente en la Sección 5 se presentan las conclusiones obtenidas.

II. CONTEXTO DE LA ASIGNATURA

Instrumentación Inteligente [2] es una asignatura de carácter transversal de 5 créditos ECTS del primer semestre del Máster en Física y Tecnologías Físicas de la Universidad de Zaragoza, impartida por profesores del Área de Electrónica. Proporciona al alumno conocimientos y capacidades para realizar con éxito un proceso de medida y caracterización de un sistema en estudio en todas sus fases, desde el diseño del interfaz electrónico a partir de unas especificaciones dadas, automatización del proceso de medida y procesamiento de datos. A partir de conocimientos adquiridos en el Grado por el estudiante, la asignatura se centra en los dispositivos de medida de magnitudes eléctricas en el límite físico.

Para un determinado sistema de instrumentación, un parámetro clave para la determinación del menor nivel de señal que puede discriminarse es la medida del ruido intrínseco del sistema de amplificación. Este tipo de medida requiere aunar múltiples técnicas y conocimientos de instrumentación avanzada, relacionados con técnicas de apantallamiento, minimización de interferencias, adquisición automatizada, determinación de rangos de medida y tratamiento de datos, para obtener la figura de mérito adecuada, y es por ello la elección realizada como actividad final.

El proyecto propuesto se plantea como un vehículo para integrar los conocimientos teórico-prácticos adquiridos a lo largo de la asignatura, abordando un proceso de caracterización complejo desde la fase de búsqueda bibliográfica y de documentación hasta el tratamiento de los datos experimentales y obtención y presentación de resultados. De esta forma, el estudiante adquiere competencias relacionadas con el análisis, tratamiento e interpretación de datos experimentales, es capaz de aplicar técnicas específicas de procesado analógico al tratamiento de la medida y aplicar técnicas básicas de procesado digital de señales para la recuperación de medidas, como es la transformada rápida de Fourier.

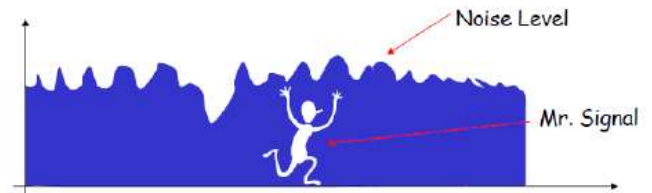


Fig. 1: Efecto del ruido en la medida de señales

Esta experiencia se ha realizado en el primer cuatrimestre del curso 2015-2016, y han participado en ella cuatro alumnos organizados en dos grupos de dos personas.

III. PROPUESTA EXPERIMENTAL

En general, los sistemas de instrumentación se caracterizan por tener señales débiles en sus entradas, de manera que uno de los principales problemas encontrados es la presencia de ruido, es decir, señales no deseadas que se superponen con la componente de señal que se procesa, modificando u ocultando parcialmente la información que contiene (Figura 1).

La primera etapa de un sistema de instrumentación es una etapa amplificadora. Si su ganancia es lo suficientemente elevada, el ruido total del sistema estará determinado por la contribución de ruido de esta primera etapa amplificadora. Este ruido puede tener dos orígenes: ruido interno, generado por el propio circuito debido a los diferentes fenómenos físicos en los dispositivos electrónicos que lo constituyen, e interferencias externas, generados por acoplamiento con otro punto del propio sistema o de sistemas externos.

Así, con independencia de que se diseñe un blindaje apropiado y se optimice el diseño para reducir las fuentes que generan el ruido, siempre hay un cierto nivel de ruido intrínseco en el circuito, que establece un límite inferior para las señales detectables. Por ello, es importante disponer de técnicas de valoración del nivel de ruido.

En los amplificadores operacionales, el ruido generado internamente [3] se modela, tal como muestra la Figura 2, mediante una fuente de tensión en la entrada y dos fuentes de corriente —una en cada entrada— que incluyen, referida a la entrada, la contribución de ruido de origen térmico, ruido flicker y ruido de golpeteo (*shot noise*), expresado en términos de las densidades espectrales de potencia de ruido de tensión e intensidad, que se miden respectivamente en V^2/Hz y A^2/Hz . Las correspondientes magnitudes proporcionales a la tensión y la corriente son llamadas densidad espectral de ruido de tensión e intensidad; estas magnitudes se miden respectivamente en V/\sqrt{Hz} y A/\sqrt{Hz} .

Los fabricantes de componentes utilizan indistintamente la densidad espectral de potencia de ruido en tensión o intensidad medida en V^2/Hz o A^2/Hz , o la densidad espectral de ruido de tensión o de intensidad medidas en V/\sqrt{Hz} y A/\sqrt{Hz} .

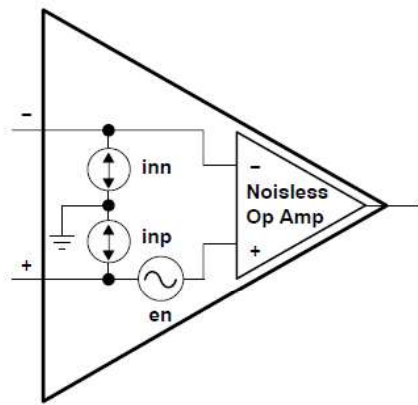


Fig. 2: Modelo de ruido interno en un Amplificador Operacional

A. Objetivo

La medida de la tensión de ruido en etapas amplificadoras supone un reto, especialmente cuando se trata de sistemas de bajo ruido, en los cuales los niveles a medir se encuentran en el rango de los nanovoltios. En la mayoría de los casos, los instrumentos disponibles para dichas medidas tienen niveles de ruido mucho mayores, por lo que es necesario un proceso previo de calibración y un detallado diseño del protocolo y sistema de medida y procesado de los datos, que en muchas ocasiones lleva a que los valores de ruido que se presentan como experimentales no pasan de ser estimaciones por simulación.

El objetivo de esta propuesta experimental es que el alumno profundice en el concepto de ruido intrínseco, analice sus efectos en sistemas de alta sensibilidad y procesado de señales de bajo nivel, y sea capaz de realizar el proceso de medida adecuado para obtener la densidad espectral de ruido de un sistema amplificador a partir de los datos adquiridos con un osciloscopio. Para ello, los estudiantes implicados en este proyecto deben, a partir de la instrumentación disponible, en primer lugar identificar las fuentes de ruido que puedan enmascarar las medidas buscadas para después establecer los mecanismos para su cancelación o reducción.

B. Diseño experimental

El esquema del sistema de caracterización de ruido empleado en esta experiencia se muestra en la Figura 3 [4]. Para caracterizar el ruido interno de un amplificador (*device under test*, DUT), el módulo post-amplificador (PA, Figura 3), se diseña con una ganancia adecuada para elevar el nivel de ruido del dispositivo bajo test por encima del ruido de base del instrumento de medida. Este instrumento debe tener la suficiente resolución temporal para realizar la medida de ruido en todo el rango de interés, incluyendo el ruido flicker, cuyo rango se encuentra entre 0.1 y 10 Hz, aproximadamente. En nuestro caso, el instrumento seleccionado es un osciloscopio digital DPO 4104 de Tektronix [5], cuya escala de tiempos permite tener una resolución frecuencial de hasta 5 mHz. Como etapa post-amplificadora se ha escogido un amplificador HA-5147 de Intersil [6] con una ganancia de +301 dada por la relación de resistencias R_3 y R_4 .

Debido a los bajos niveles de ruido que deben medirse, puede ser necesario aplicar factores de ganancia muy elevados, que pueden llegar a saturar la salida debido a los niveles de tensión de offset de continua. Para evitar este problema, las diferentes etapas con ganancia deben acoplarse mediante los adecuados filtros de paso alto. Estos filtros deben impedir el paso de los niveles de DC, evitando así la saturación en las salidas amplificadas, pero con una frecuencia de corte suficientemente baja como para no limitar el rango frecuencial del ruido bajo estudio. Así, el acoplo entre DUT y post-amplificador, y post-amplificador e instrumento deberá hacerse en AC mediante sendos filtros pasivos RC formados por los pares $R_5 - C_1$ y $R_6 - C_2$ respectivamente, con frecuencias de corte de 6 mHz.

Para evitar interferencias debidas a emisiones de radiofrecuencia, así como variaciones térmicas los estudiantes introducen el sistema a caracterizar dentro de una caja de cobre con conexión a tierra, manteniendo de esta forma cierta inercia en la temperatura y un buen aislamiento eléctrico externo. Además, para evitar interferencias asociadas a bucles de tierra y ruido proveniente de las fuentes de alimentación, ésta se realiza mediante pilas. Las Figuras 4 y 5 muestran una imagen del montaje experimental llevado a cabo por los estudiantes y un detalle del módulo aislado eléctricamente, respectivamente.

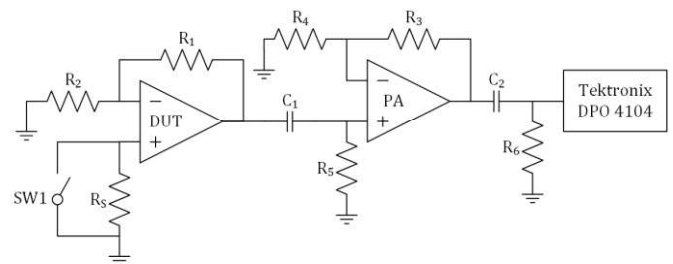


Fig. 3: Esquema del sistema de medida de ruido



Fig. 4: Montaje experimental del sistema de medida de ruido

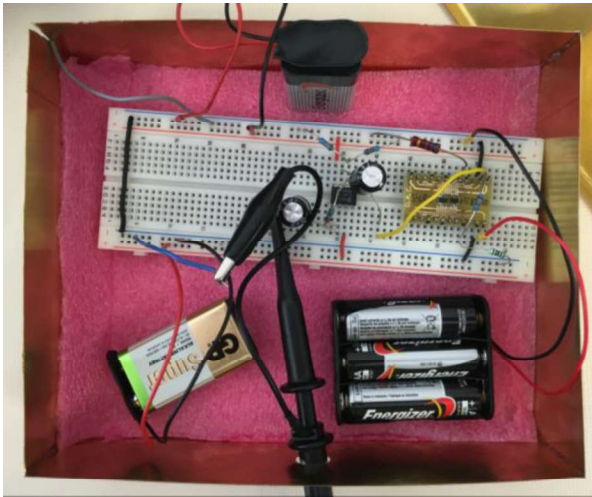


Fig. 5: Detalle del montaje experimental

Una vez configurado el sistema de medida, los estudiantes deben establecer el protocolo de medida necesario. El ruido interno en la salida V_{no} de un DUT como el mostrado en la Figura 3 para una cierta frecuencia y supuesto que las diferentes fuentes no están correlacionadas viene dado por la expresión

$$V_{no} = G_{DUT} \sqrt{V_{ni}^2 + A_{ni}^2 + J_{ni}^2} = G_{DUT} \sqrt{V_{ni}^2 + I_{ni}^2 (R_s^2 + (R_1 \parallel R_2)^2) + 4kT(R_s + R_1 \parallel R_2)} \quad (1)$$

donde V_{ni} , A_{ni} y J_{ni} son los ruidos en tensión, corriente y Johnson en la entrada, respectivamente, G_{DUT} es la ganancia $(I+R_2/R_1)$ de la etapa, I_{ni} la corriente de ruido, T la temperatura en grados Kelvin y k la constante de Boltzmann.

C. Realización experimental

La medida del ruido del DUT requiere elevar su nivel por encima de los suelos de ruido del resto de elementos del sistema de medida, es decir, del post-amplificador y el osciloscopio. La estimación de ruido de la etapa del post-amplificador se realiza de forma similar al mostrado en (1) para el DUT, mientras el correspondiente al osciloscopio se obtiene experimentalmente. Para ello, se realiza un calibrado inicial llevando la sonda a cortocircuito dentro de la caja aislante donde se realizarán las medidas. En este caso, los alumnos emplearon el osciloscopio Tektronix DPO 4104, aplicando la función matemática FFT proporcionada por el osciloscopio sobre la señal de cortocircuito de la sonda. Dado el rango de frecuencias de trabajo (0.1 a 500 Hz) así como la resolución de 5 mHz necesaria, la estimación de un espectro completo requiere un tiempo de aproximadamente 100 s. Para la toma de las medidas los estudiantes diseñaron el sistema automatizado de adquisición y procesado de datos, con el control a través del puerto USB del osciloscopio, empleando la librería de control de instrumentación de Matlab [7].

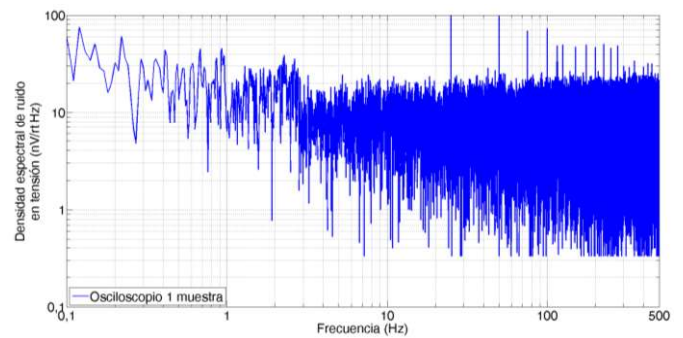
La obtención del ruido precisa del promediado en un número elevado de medidas en el rango de frecuencias de 0.1 a 500 Hz, que permita obtener un espectro definido tanto en la zona plana de ruido como en la región de ruido flicker. La

Figura 6 muestra la diferencia en la densidad espectral de ruido del osciloscopio obtenida en una única medida con la obtenida en el promediado en 500 muestras consecutivas.

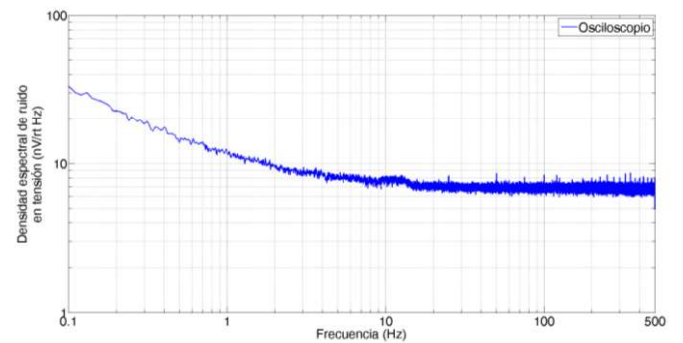
Dado que las medidas de ruido se proporcionan en unidades de V/\sqrt{Hz} , y que el espectro proporcionado por el osciloscopio se obtiene en unidades de dBV , es necesario que los estudiantes efectúen adecuadamente el cambio de unidades, de acuerdo con la expresión

$$Spectral_density \left(\frac{V_{RMS}}{\sqrt{Hz}} \right) = \frac{10^{\frac{dBV_{RMS}}{20}}}{\sqrt{1.056 * RBW}} \quad (2)$$

donde dBV_{RMS} es la lectura del espectro del osciloscopio, RBW el ancho de banda de la medida (en este caso 500 Hz) y la constante 1.056 se asocia al empleo de la FFT en el cálculo de la densidad espectral [3].



(a)



(b)

Fig. 6: Densidad espectral de ruido del osciloscopio (a) una única muestra; (b) promediado de 500 muestras

Una vez obtenido el nivel de ruido base del instrumento, debe estimarse el valor de ganancia de la etapa post-amplificadora, de manera que los niveles de ruido del DUT se encuentren por encima. El amplificador escogido como DUT es un ISL28148 [8]. Para amplificar el nivel de ruido, el PA seleccionado es configurado con una ganancia 301, suficiente para que el nivel de ruido del PA supere al del osciloscopio, validando así los valores medidos. Además, el PA se acopla al instrumento mediante un RC externo que hace de filtro pasa alta de frecuencia de corte 0.06 Hz. La Figura 7 muestra la

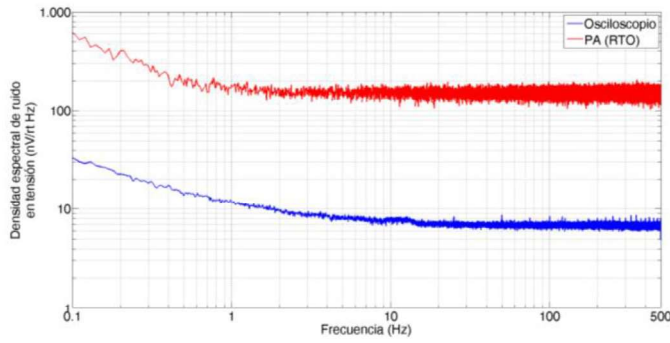


Fig. 7: Densidad espectral de ruido en tensión a la salida (RTO) del PA (rojo) comparado con la del osciloscopio (azul). El factor de ganancia permite medir correctamente los valores al situarlos por encima del nivel de ruido base del osciloscopio.

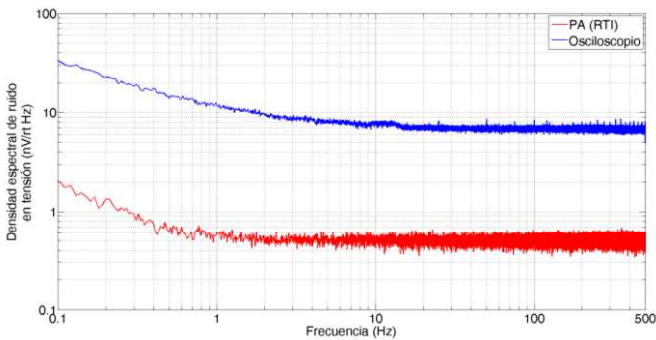


Fig. 8: Densidad espectral de ruido respecto a la entrada (RTI) del PA (rojo) comparado con la del osciloscopio (azul).

densidad espectral de ruido en la salida del PA (con el factor de ganancia 301) comparada con la del osciloscopio.

Representando la densidad espectral de ruido del PA referido a la entrada en comparación con la del osciloscopio (Figura 8) puede observarse la necesidad de aplicarle el factor de ganancia propuesto.

Una vez establecido el suelo de ruido del sistema de medida, los estudiantes deben determinar la ganancia que han de programar en el DUT para realizar las medidas de ruido, tanto para la densidad espectral de ruido de tensión como de corriente. Además, para poder efectuar medidas de densidad de ruido espectral en corriente deberán estimar el orden de magnitud de la resistencia R_S empleada para obtener una tensión de ruido a partir de dicha corriente. Para el DUT propuesto, un amplificador con entradas a puerta de transistores MOS, las corrientes indicadas por el fabricante son del orden de los femtoamperios. Los estudiantes deben a partir de esa información dar un valor adecuado a R_S .

La Figura 9 muestra superpuestos los suelos de la densidad espectral del ruido del osciloscopio (negro), post-amplificador respecto a la salida (rojo) y la densidad espectral de ruido del DUT a la salida sin desacoplar del PA (azul), empleando una resistencia R_S de 5 M Ω . Dicha curva corresponde al ruido asociado a corriente y tensión en el DUT. Para desacoplar las medidas, se realiza una batería de medidas similares

sustituyendo la resistencia R_S por un cortocircuito. De esta manera, la corriente de ruido a la entrada del DUT se puede obtener de acuerdo con la expresión

$$I_{ni} = \frac{\sqrt{\frac{V_{no}^2|_{R_{DUT}=R_S}}{G_{DUT}^2 * G_{PA}^2} - \frac{V_{no}^2|_{R_{DUT}=0}}{G_{DUT}^2 * G_{PA}^2} - 4kTR_S}}{R_S} \quad (3)$$

donde $V_{no}^2|_{R_{DUT}}$ es el ruido en tensión respecto a la salida del DUT sin desacoplar del efecto del PA (que queda cancelado en la resta de términos) y G_{PA} la ganancia del post-amplificador. Una vez obtenida la corriente de ruido, Los estudiantes han medido todos los datos necesarios. Una vez estimada I_{ni} , se puede obtener el valor de la tensión de ruido a la entrada del amplificador a partir de (1):

$$V_{ni} = \sqrt{\frac{V_{no}^2}{G_{DUT}^2} - A_{ni}^2 - J_{ni}^2} = \sqrt{\frac{V_{no}^2}{G_{DUT}^2} - I_{ni}^2 (R_S^2 + (R_1 || R_2)^2) - 4kT(R_S + R_1 || R_2)} \quad (4)$$

Para obtener el ruido de tensión respecto a la salida del DUT, desacoplamos las medidas respecto del post-amplificador. Suponiendo que ambos ruidos no están correlacionados, (4) se puede expresar como:

$$V_{ni} = \sqrt{\frac{V_{no}^2|_{R_{DUT}=0}}{G_{DUT}^2 * G_{PA}^2} - PA_n^2 - J_{ni}^2 (R_S^2 + (R_1 || R_2)^2) - 4kT(R_S + R_1 || R_2)} \quad (5)$$

donde PA_n^2 es el ruido del post-amplificador desde su salida.

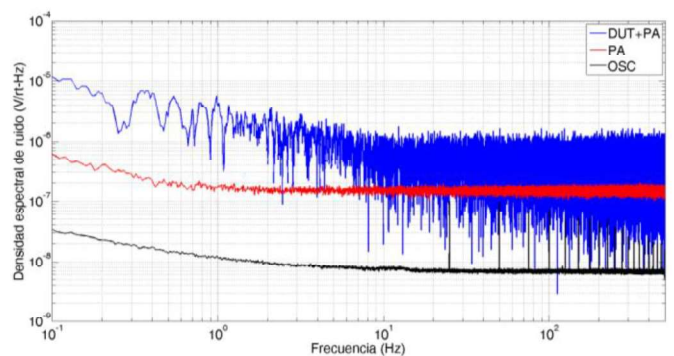


Fig. 9: Densidad espectral de ruido del osciloscopio (negro), respecto a la salida del PA (rojo) y densidad espectral de ruido de corriente del DUT a la salida, sin desacoplar del PA (azul).

IV. DISCUSIÓN

El proceso de medida de ruido interno de un amplificador es una tarea que requiere de una planificación muy precisa, caracterización exacta de los elementos implicados así como de un sistema de adquisición de datos automatizable. Debido a los bajos niveles de señal obtenidos, se hace necesario promediar un gran número de medidas, entre 200 y 5000 según el ruido a medir, con unos largos tiempos de adquisición de cada medida (para el rango de 500 Hz y una resolución en frecuencia de 5 mHz, 100.000 puntos por medida suponen más de 100 segundos), por lo que es preciso el empleo de instrumentos controlables por computador. Además, obtener la densidad espectral de ruido de tensión y corriente en la entrada del DUT a partir de las medidas con el osciloscopio requiere un tratamiento de datos adecuado. Así, los alumnos que realizan esta actividad desarrollan sus conocimientos en diferentes ámbitos de la instrumentación y medida, diseño del experimento, programación del sistema de automatización de medida y tratamiento de datos y obtención de conclusiones. La Tabla I presenta los valores nominales de los componentes pasivos seleccionados por los alumnos, así como los valores de densidad espectral de ruido medidos.

TABLA I. VALORES NOMINALES DE COMPONENTES Y RESULTADOS OBTENIDOS

Parámetro	Valor
R_1 (Ω)	50k
R_2 (Ω)	1k
R_3 (Ω)	30k
R_4 (Ω)	100
R_5 (Ω)	18k
R_6 (Ω)	18k
R_5 (Ω)	6M
C_1 (μ F)	150
C_2 (μ F)	150
G_{PA}	301
G_{DUT}	11
Ruido_ OSC (nV/ \sqrt Hz)	7
Ruido_PA (salida) (nV/ \sqrt Hz)	150
Ruido_PA (entrada) (nV/ \sqrt Hz)	0.5
Ruido_DUT (nV/ \sqrt Hz)	34
Ruido_ OSC @0.1Hz (nV/ \sqrt Hz)	33.39
Ruido_PA @0.1Hz (salida) (nV/ \sqrt Hz)	620.4
Ruido_PA @0.1Hz (entrada) (nV/ \sqrt Hz)	2.06
Ruido_DUT @0.1Hz (nV/ \sqrt Hz)	1000

V. CONCLUSIONES

Tras realizar esta primera actividad de medida de la densidad espectral del ruido de entrada en un amplificador de bajo ruido, los estudiantes implicados han valorado muy positivamente la experiencia. Han considerado que las habilidades experimentales puestas en práctica tanto a nivel de control de instrumentación como de procesamiento de datos, así como la búsqueda y el estudio de documentación específica han supuesto la aplicación transversal de conocimientos teóricos y prácticos recibidos en diversos módulos del máster. Así, podemos concluir que en general el grado de consecución de los objetivos propuestos ha sido muy satisfactorio, aunque debemos destacar que el esfuerzo requerido por parte de los equipos de trabajo del proyecto ha sido superior al previsto inicialmente. En cuanto al cuerpo docente implicado de este proyecto, consideramos que la experiencia ha sido muy satisfactoria, si bien en próximos cursos se intentará ajustar con mayor precisión la carga de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] <http://titulaciones.unizar.es/fisica-tec-fis/index.html>, último acceso 21/02/2016
- [2] <http://titulaciones.unizar.es/asignaturas/60036/index15.html>, último acceso 21/02/2016
- [3] A. Kay, Operational Amplifier Noise, Techniques and Tips for Analyzing, Newnes, 2012
- [4] D. Lafontaine, Making Accurate Voltage Noise and Current Noise Measurements on Operational Amplifiers Down to 0.1 Hz, Intersil, enero 2011
- [5] MSO4000 and DPO4000 Series Digital Phosphor Oscilloscopes Programmer Manual, Tektronix, 2010
- [6] HA-5147 Datasheet, Intersil, noviembre 2015
- [7] Matlab Instrument Control Toolbox User's Guide, The MathWorks Inc., 2015
- [8] ISL28148 Datasheet, Intersil, enero 2016