



Facultad de Ciencias
Departamento de Física

Caracterización del Lock-In Amplifier HF2LI para la operación de Espectroscopia de Resonancia Ultrasónica en Sólidos

Proyecto Experimental

Daniel Felipe Vargas Castillo
Código: 201914749

Profesora asesora: Paula Giraldo Gallo. Ph.D.
Profesor revisor: Dr. Alejandro García

19 de mayo de 2022

1. Estado del arte

Actualmente, uno de los temas de interés en el ámbito de la física de la materia condensada es la descripción y caracterización de los sólidos y sus transiciones de fase. Del modelo teórico de los sólidos, se encontró que hay una relación importante entre los coeficientes de elasticidad y las transiciones de fase [1]. Los coeficientes de elasticidad son unas constantes propias de cada sólido que describen como es la deformación en cada una de las direcciones dadas por los diferentes esfuerzos aplicados [1]. La relevancia de estos coeficientes es que, al encontrarlos explícitamente, se pueden determinar las transiciones de fase de un sólido y, en general, todas las características termodinámicas del mismo [2, 3]. Asimismo, al determinar las transiciones de fase del sólido, es posible calcular los coeficientes de elasticidad y obtener, consecuentemente, las características termodinámicas [2, 3].

A partir de lo anterior, surge la necesidad de diseñar un experimento que permita deformar de manera controlada un sólido para poder encontrar experimentalmente los coeficientes de elasticidad y determinar las transiciones de fase. Para ello, surge la técnica de Espectroscopia de Resonancia Ultrasónica en sólidos (RUS). En la Figura 1 se puede apreciar un modelo esquemático de la técnica RUS. Esta consiste en colocar una muestra sólida en un compartimiento con dos transductores piezoeléctricos. Estos son materiales que al aplicarles un voltaje sufren deformaciones y al deformarlos generan diferencias de potencial. A continuación, un generador de señales inducirá sobre el piezoeléctrico emisor una señal AC de voltaje a una frecuencia particular [4, 5, 6, 7]. Al realizar lo anterior, el piezoeléctrico va a sufrir deformaciones periódicas que interaccionarán con la muestra sólida. El sólido procederá a deformarse y el transductor receptor captará las vibraciones del sólido para nuevamente generar un voltaje [4, 5, 6, 7]. Una vez con el voltaje de salida, se realiza una amplificación al mismo y se limpia la señal con el fin de obtener exclusivamente las vibraciones propias del sólido [4, 5, 6, 7]. El objetivo de la técnica es detectar a que frecuencias resuena la muestra, ya que esto permite obtener los coeficientes de elasticidad del sólido en cuestión, los cuales describen toda la información del sólido para una temperatura dada [4, 5, 6, 7].

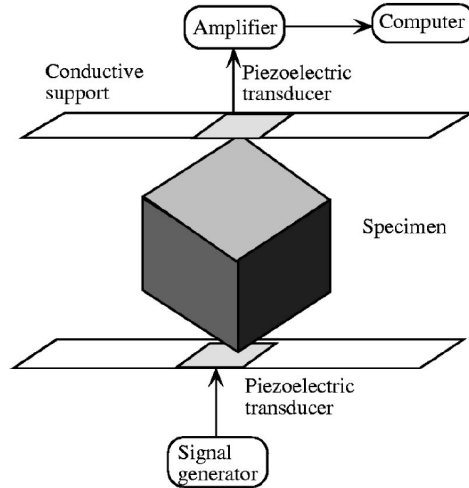


Figura 1: Esquema del funcionamiento de la técnica de espectroscopia por resonancia ultrasónica en sólidos (RUS). Tomado de [4]

Para el presente proyecto, se busca analizar la parte electrónica del montaje presentado en la Figura 1, ya que para poder inducir la señales de salida a frecuencias determinadas y poder leer, amplificar y limpiar la señal de entrada, se necesita un hardware especializado, como un RedPitaya o, el presente a caracterizar, el Lock-In Amplifier HF2LI [8].

En el laboratorio de materiales cuánticos de la Universidad de los Andes se tiene un dispositivo RedPitaya el cuál es una tarjeta programable que permite ser configurada como Lock-In Amplifier [8]. Para el uso y la programación de la misma, se debe emplear LabVIEW, un software de libre acceso desarrollado por Los Alamos National Laboratory [8]. Sin embargo, la Universidad de los Andes adquirió recientemente un Lock-In Amplifier HF2LI de Zurich Instruments, el cuál es un dispositivo construido con múltiples funciones de las cuales la más importante y relevante para el proyecto es la de Lock-In Amplifier. Para su uso, se debe utilizar Lab One, un software de libre acceso desarrollado por Zurich Instruments [8].

2. Problema de investigación

En el presente proyecto se busca caracterizar el nuevo equipo Lock-in Amplifier HF2LI para la medición de espectros de resonancia ultrasónica en sólidos al compararlo con el equipo de medición RedPitaya encontrado en la Universidad de los Andes. Con lo anterior, se busca evaluar si existe una posible mejora en las propiedades eléctricas y operacionales como la precisión, el ruido y el ancho de banda del Lock-in Amplifier

HF2LI.

3. Justificación

Es importante la problemática y el desarrollo del presente proyecto ya que el análisis previo del funcionamiento de cualquier equipo experimental empleado en investigación es fundamental. Con base en esto, se asegura que las mediciones realizadas en futuros experimentos se puedan validar, replicar y corroborar. Asimismo, la realización del proyecto permitirá establecer los rangos de incertidumbres experimentales para las diferentes variables medibles con el Lock-in Amplifier HF2LI.

Por otra parte, el establecimiento de un protocolo de comunicación entre el Lock-in Amplifier HF2LI y demás equipo del laboratorio de Materiales Cuánticos permitirá facilitar y coordinar los futuros experimentos realizados en el laboratorio.

Por último, al establecer las diferencias de las propiedades eléctricas del Lock-in Amplifier HF2LI con el RedPitaya de la Universidad de los Andes, se podrá determinar que equipo es más óptimo para desarrollar experimentos de RUS.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

- Caracterizar el nuevo equipo Lock-in Amplifier HF2LI para la medición de espectros de resonancia ultrasónica en sólidos del laboratorio de materiales cuánticos de la Universidad de los Andes.

4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un protocolo de comunicación para el funcionamiento del nuevo equipo Lock-in Amplifier HF2LI en experimentos de resonancia ultrasónica en sólidos junto a los dispositivos experimentales presentes en el laboratorio.
- Determinar las propiedades eléctricas del nuevo equipo Lock-in Amplifier HF2LI para experimentos de resonancia ultrasónica en sólidos en el espacio de tiempo y de frecuencia.

- Comparar las propiedades eléctricas del nuevo equipo Lock-in Amplifier HF2LI respecto al equipo RedPitaya presente en el laboratorio en el espacio de tiempo y en el espacio de frecuencia.

5. Montaje Experimental

Para el desarrollo del presente proyecto se empleará principalmente un Lock-In Amplifier modelo HF2LI de Zurich Instruments, el cuál se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2: Lock-In Amplifier HF2LI de Zurich Instruments visto en perspectiva, de frente y de atrás, respectivamente. Tomado de [9].

El Lock-In Amplifier presenta dos entradas (Signal Input) y dos salidas (Signal Output). Las entradas poseen dos puertos tipo BNC. El puerto +In permite leer la señal de entrada que se conecte para un análisis posterior, mientras que el puerto -In Diff permite analizar la señal +In a partir de la señal -In Diff. Cabe aclarar que, internamente, el Lock-In Amplifier HF2LI fija la señal -In Diff a 0 V cuando no se activa la función de este puerto [9].

Por otro lado, las dos salidas presentan tres puertos BNC, el puerto Out es por donde se obtiene la señal de salida previamente configurada. El puerto Add permite añadir una señal externa a la señal de salida del puerto Out. Por último, el puerto Sync permite obtener la misma señal de salida del puerto Out antes de

ser amplificada en el proceso de configuración [9].

Para poder interactuar con el Lock-In Amplifier se necesita Lab One, el cuál es un software de libre acceso desarrollado por Zurich Instruments [9]. Sin embargo, también se puede descargar una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) adecuada. Estas APIs son desarrolladas por Zurich Instruments y permiten obtener los paquetes necesarios para operar el Lock-In Amplifier mediante otros lenguajes de programación [9].

Por otra parte, también se empleará un RedPitaya modelo STEMLab 125-14, el cuál se presenta en la Figura 3.

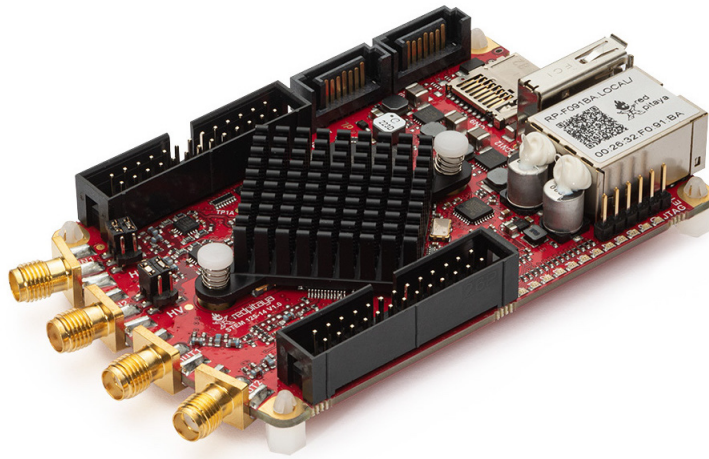


Figura 3: RedPitaya modelo STEMLab 125-14 visto en perspectiva. Tomado de [10].

El RedPitaya modelo STEMLab 125-14 presenta dos puertos In de entrada y dos puertos Out de salida tipo SMA, los cuales son utilizados para la lectura y la generación de señales, respectivamente. Además, el RedPitaya posee un puerto para tarjetas SD con Linux OS, lo que permite que sea reprogramable para ser empleado en diferentes experimentos. En especial, se puede desarrollar e instalar un programa en una tarjeta SD que permita operar con el RedPitaya como Lock-In Amplifier, lo que posibilita realizar barridos de frecuencia [10].

Por último, se utilizará una caña en G-10 la cuál se puede observar en la Figura 4. Esta caña fue construida para realizar experimentos de RUS en el National High Magnetic Field Laboratory en Tallahassee [7]. A partir del esquema presentado en la Figura 1, la caña es el dispositivo que contiene los dos transductores piezoeléctricos, el piezoeléctrico emisor y el receptor. Asimismo, la caña en G-10 presenta dos puertos SMA:

un puerto Bottom, de donde entra la señal eléctrica que ha sido generada externamente, y un puerto Top, el cuál es de donde se obtiene la señal eléctrica resultante de haber transformado las deformaciones de una muestra en diferencias de potencial.



Figura 4: Caña para experimentos de RUS fabricada en G-10. En la parte izquierda de la figura se encuentran los dos puertos SMA Top y Bottom, mientras que en la parte derecha se encuentran los dos transductores piezoeléctricos.

6. Metodología

En primera instancia, se debe instalar el software LabVIEW y Lab One en un computador, esto con el fin de conectarse con el RedPitaya y el Lock-In Amplifier HF2LI, respectivamente. Para conectarse al RedPitaya, se necesita la IP del dispositivo y conexión a Ethernet. Mientras que para conectarse al Lock-In Amplifier HF2LI se requiere un cable propio del dispositivo, el cuál presenta un puerto USB.

Una vez conectado el equipo de laboratorio, se procederá a adaptarse a las funcionalidades claves que permiten la medición de las propiedades eléctricas del dispositivo Lock-In Amplifier HF2LI y el desarrollo de los experimentos propios de resonancia ultrasónica en sólidos. Para ello, se deberán seguir los instructivos y la literatura [8, 9] en los que se encuentra como opera el Lock-In Amplifier HF2LI.

Cuando ya se haya completado la introducción a los software LabVIEW y Lab One, se procederá a medir las propiedades eléctricas del Lock-In Amplifier HF2LI. Para ello, se empleará un osciloscopio junto a cables coaxiales SMA con adaptadores BNC - SMA. Para este propósito, se emplearán varias funcionalidades del osciloscopio, como la transformada rápida de Fourier (FFT) para realizar mediciones en el espacio de frecuencias y el modo base para realizar mediciones en el espacio temporal.

Finalmente, para generar la comparación de las propiedades eléctricas entre el Lock-In Amplifier HF2LI y

el RedPitaya y para desarrollar el protocolo de integración entre estos dos dispositivos y demás equipo en el laboratorio de Materiales Cuánticos, se utilizarán las funcionalidades disponibles en LabVIEW y Lab One junto al desarrollo de código en un lenguaje de programación que permita la comunicación entre todos los elementos anteriormente mencionados.

7. Presupuesto

Los materiales previstos para el desarrollo del presente proyecto serán: una tarjeta RedPitaya con un costo de 373 dolares o aproximadamente 1'381.518 pesos colombianos, un Lock-In Amplifier HF2LI de Zurich Instruments con un costo aproximado de 70'000.000 pesos colombianos, 4 cables coaxiales SMA con un costo de 40.000 pesos colombianos por unidad y 2 adaptadores BNC - SMA con un costo de 13.000 pesos colombianos por unidad. Con base en lo anterior, el presupuesto total para el proyecto es de 71'567.518 pesos colombianos.

8. Resultados

8.1. Protocolo de comunicación entre el Lock-In Amplifier HF2LI y el equipo presente en el laboratorio de Materiales Cuánticos

Para desarrollar el protocolo de comunicación entre el Lock-In Amplifier y los demás dispositivos experimentales se notó, en primera instancia, que el software con el que se controlan los equipos de RUS es LabVIEW. Este último es un entorno de programación gráfica empleado en el desarrollo de pruebas automatizadas de investigación, validación y producción a través de Instrumentos Virtuales (VIs) [11]. Por lo tanto, para comunicar al Lock-In Amplifier, es necesario poder controlarlo mediante comandos propios del ambiente de LabVIEW. Es en este punto donde las Interfaces de Programación de Aplicaciones (APIs) de LabOne son de vital importancia, ya que una de estas interfaces permite ejecutar los comandos de LabOne en LabVIEW [11].

A partir de lo anterior, en la Figura 5 se puede apreciar el protocolo generado para lograr la operación del Lock-In Amplifier junto con LabVIEW y los equipos presentes en el laboratorio de Materiales Cuánticos.

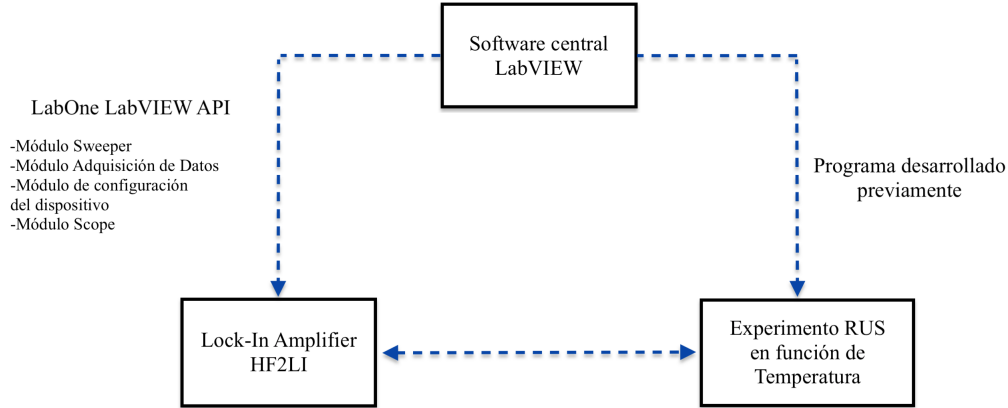


Figura 5: Esquema del protocolo de conexión para el control del Lock-In Amplifier a través del Software LabVIEW, así como de comunicación con el equipo necesario para llevar a cabo experimentos de RUS en función de la Temperatura.

De la Figura 5 se puede apreciar que, para conectar LabVIEW al experimento de RUS en función de la Temperatura, existe un programa que ha sido previamente desarrollado en el laboratorio. Asimismo, para enlazar el Lock-In Amplifier a LabVIEW es necesario el uso de la API mencionada con anterioridad, donde se recomienda instalar los siguientes módulos: El módulo Sweeper, el cuál permite obtener los datos del Lock-In Amplifier mientras se realiza un barrido de frecuencias; el módulo de Adquisición de Datos para realizar tomas de datos asincrónicas (no se necesita la participación activa del usuario) y para calcular propiedades de las señales registradas como FFT; el módulo de configuración del dispositivo para guardar y cargar información o configuraciones previas en formato `.xml` y el módulo Scope para obtener la información que podría proveer un osciloscopio [12].

Cabe aclarar que, para conectar el Lock-In Amplifier con el montaje de RUS en función de la Temperatura, solo es necesario realizar las conexiones pertinentes entre los dispositivos mediante cables coaxiales SMA o BNC y adaptadores BNC - SMA.

8.2. Medición de la propiedades eléctricas del Lock-In Amplifier HF2LI

La primera propiedad analizada fue el ruido eléctrico que presentan los puertos +In de cada una de las entradas. Para ello, se realizó un barrido de frecuencias desde uno de los puertos Out desde 0 Hz hasta 50 MHz con una amplitud de 100 mV Vpk y se obtuvo la señal resultante de uno de los puertos +In, la cuál se presenta en la Figura 6.

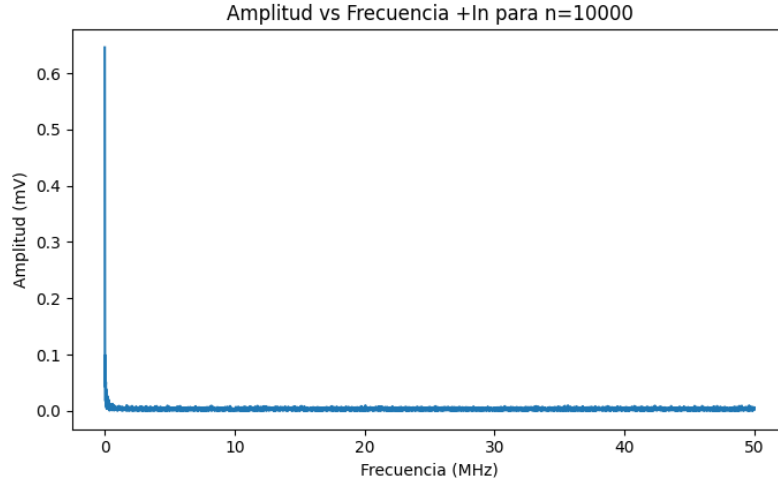


Figura 6: Amplitud r en función de la frecuencia f del puerto +In para un barrido de $n = 10000$ puntos desde 0 Hz hasta 50 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s.

En la Figura 6 se puede apreciar que aparece un pico en la amplitud a bajas frecuencias, lo que dificulta el análisis del comportamiento de la misma para la mayor parte del espectro. Con base en lo anterior, se realizó un corte para determinar desde que frecuencia f_{corte} se presentaba un ruido menor a $10 \mu\text{V}$. Del código realizado empleando el lenguaje de programación de Python ¹, se obtuvo un valor de $f_{\text{corte}} = 0,62 \text{ MHz}$. En la Figura 7 se graficó la amplitud en el rango de 0.62 MHz hasta los 50 MHz.

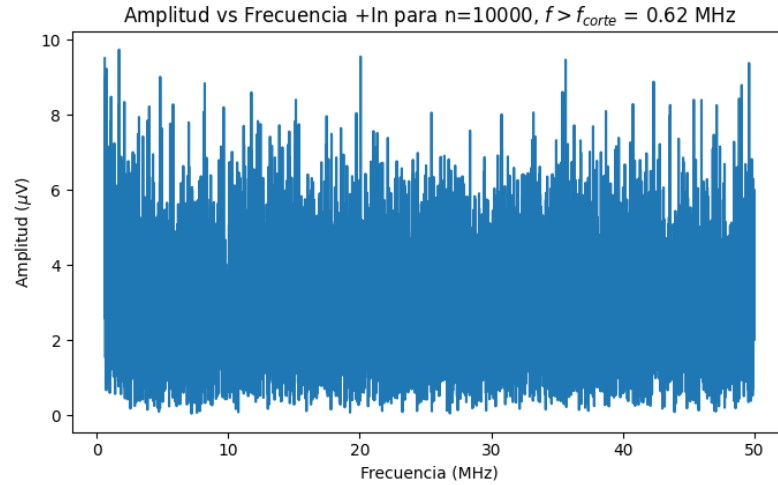


Figura 7: Amplitud r en función de la frecuencia f del puerto +In desde 0.62 MHz hasta 50 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s.

¹El respectivo código se encuentra disponible en el siguiente repositorio de GitHub: <https://github.com/DanielVC20/Proy-LockIn-Amplifier>

Del código desarrollado se encontró que la amplitud promedio es de $\mu_r = 2,89 \mu\text{V}$ con una desviación estándar de $\sigma_r = 1,51 \mu\text{V}$. Por ende, el ruido electrónico promedio obtenido para la entrada +In en el intervalo de 0.62 MHz hasta los 50 MHz es de $2,89 \pm 1,51 \mu\text{V}$.

Por otro lado, en la Figura 8 se muestran los datos de amplitud en el rango de 0 Hz hasta los 620 kHz.

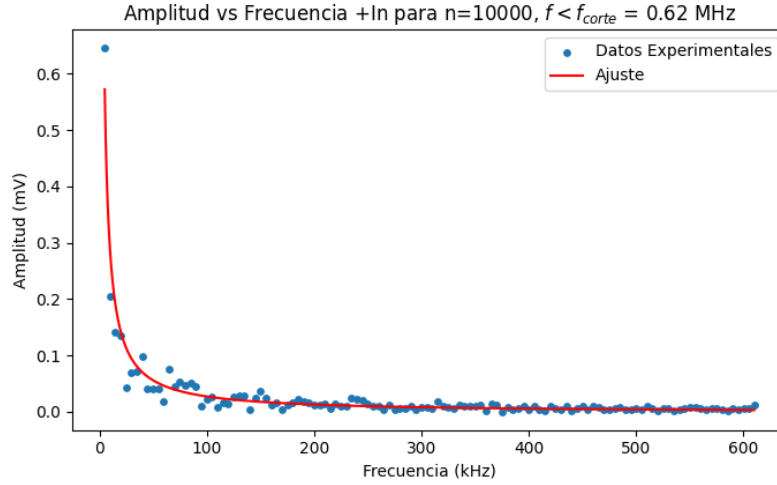


Figura 8: Amplitud r en función de la frecuencia f del puerto +In desde 0 Hz hasta 620 kHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s.

En la Figura 8 se evidencia que la amplitud exhibe una mayor variabilidad para este intervalo. Sin embargo, se puede apreciar que la amplitud presenta una tendencia de proporcionalidad inversa a la frecuencia, similar al ruido $1/f$. Para comprobar lo anterior, se ajustó una función de la forma

$$r(f) = \frac{A}{f} + B, \quad (1)$$

donde A y B son constantes a determinar. Del código desarrollado se obtuvieron unos valores para estas constantes de $A = 2,87 \text{ VHz}$ y $B = -1,3 \times 10^{-6} \text{ V}$. De la Figura 8 se observa que el ajuste realizado logra reproducir en gran medida los datos experimentales, en consecuencia, se podría emplear este modelo para estimar la amplitud del ruido a una frecuencia particular en el intervalo de 0 Hz hasta 620 kHz. Para analizar el desempeño del ajuste, se calculó la métrica R^2 obteniendo un valor de $R^2 = 0,94$. Además, se graficaron los residuos entre los datos experimentales y el ajuste realizado, obteniendo la Figura 9.

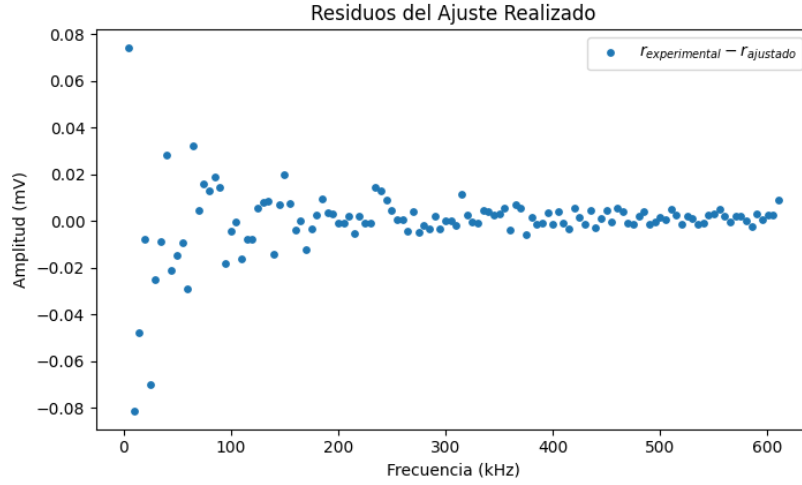


Figura 9: Residuos de la amplitud r del ajuste realizado en función de la frecuencia f , en donde se grafica la diferencia de la amplitud entre los datos experimentales y el ajuste realizado.

De la Figura 9 se puede observar que no hay una tendencia clara de los residuos, ya que para un valor particular de las frecuencias, los residuos de la amplitud suelen ubicarse en un intervalo simétrico centrado cerca de 0 mV.

Cabe resaltar que en la Figura 8, la amplitud de la mayoría de frecuencias se encuentra por debajo de 0.1 mV. De acuerdo con esto, se puede calcular el ruido electrónico promedio para las frecuencias que cumplan con la condición de tener una amplitud menor o igual a 0.1 mV. Se encontró que, para frecuencias mayores a 25 kHz, se cumple con la condición anterior. Una vez determinado este corte, del código desarrollado se encontró que la amplitud promedio para el intervalo definido por este corte es de $\mu_r = 15,26 \mu V$ con una desviación estándar de $\sigma_r = 16,67 \mu V$. En consecuencia, el ruido electrónico promedio obtenido para la entrada +In en el intervalo de 25 kHz hasta los 620 kHz es de $15,26 \pm 16,67 \mu V$.

A continuación, se midió la respuesta del puerto +In al conectar la señal obtenida de uno de los puertos Out, desde el cuál se realizó un barrido de frecuencias desde 0 Hz hasta 50 MHz con una amplitud de 100 mV Vpk. En la Figura 10 se puede apreciar la amplitud obtenida para el espectro de frecuencias, junto a las señales obtenidas mediante un osciloscopio para diferentes cortes de frecuencia.

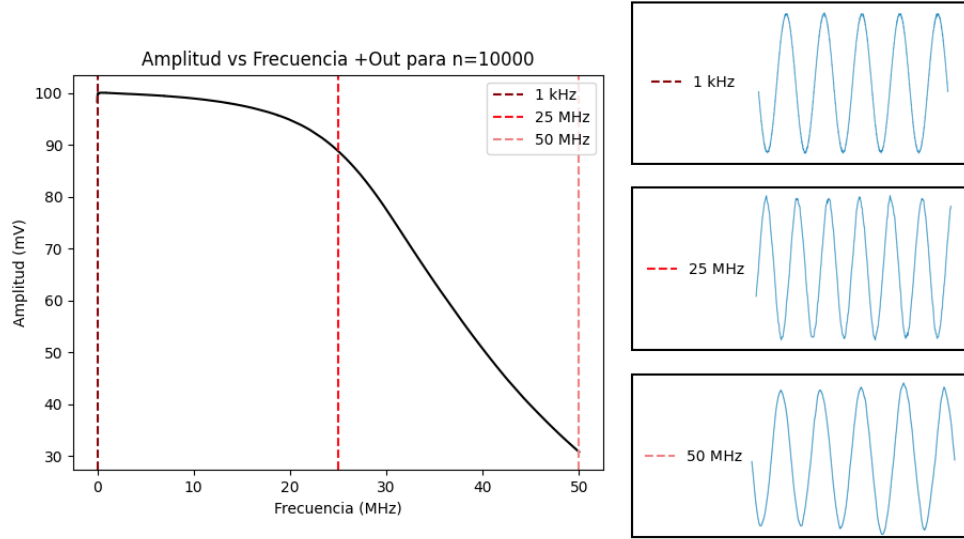


Figura 10: Amplitud r en función de la frecuencia f al conectar el puerto +In con el Out para un barrido de $n = 10000$ puntos desde 0 MHz hasta 50 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s. Al lado derecho se presenta la señal generada en un osciloscopio para cortes de frecuencia de 1 kHz, 25 MHz y 50 MHz.

De la Figura 10 se puede apreciar que el Lock-In Amplifier presenta un filtro pasa-bajas que regula la amplitud a frecuencias altas. Asimismo, las señales generadas para las frecuencias de 1 kHz y 25 MHz presentan un comportamiento sinusoidal sin ninguna variación o perturbación aparente. En cambio, para la frecuencia de 50 MHz se presenta un comportamiento sinusoidal en el cuál la amplitud varía ligeramente para cada oscilación de la señal.

Adicionalmente, en la Figura 11 se presenta la amplitud tomando una escala lineal (anteriormente presentada) y logarítmica para la frecuencia. Esto se debe a que, al visualizar la frecuencia en potencias de 10 Hz, se puede comparar de mejor manera los cambios de amplitud significativos a lo largo del barrido de 0 Hz hasta 50 MHz.

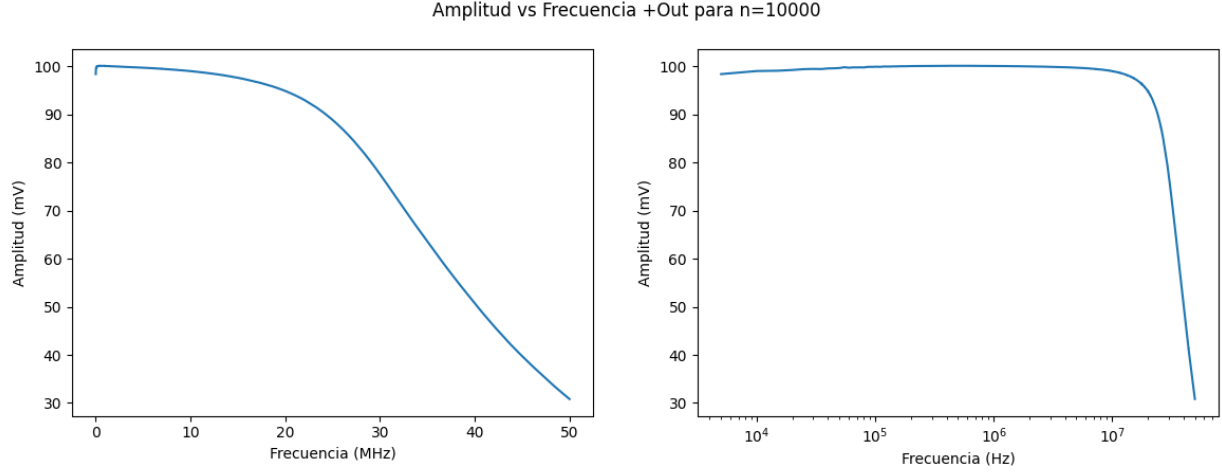


Figura 11: (a) Amplitud r en función de la frecuencia f al conectar el puerto +In con el Out para un barrido de $n = 10000$ puntos desde 0 MHz hasta 50 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s. (b) Amplitud r en función de la frecuencia f donde el eje de la frecuencia presenta una escala logarítmica.

De la Figura 11 se puede evidenciar que, para frecuencias superiores a los 10 MHz, la amplitud varía significativamente, ya que esta presenta una reducción de $\Delta r = 70$ mV en el orden de los 10^7 Hz. No obstante, como el rango comúnmente utilizado en experimentos de Espectroscopia de Resonancia Ultrasónica en sólidos (RUS) es entre los 0 Hz hasta los 10 MHz [4], el efecto mencionado no adquiere una relevancia a la hora de realizar barridos en dicho intervalo.

Ahora, una vez analizado todo el espectro en el que funciona el Lock-In Amplifier, se procederá a concentrarse en el análisis de las propiedades eléctricas en el rango mencionado con anterioridad.

A continuación se procedió a medir el ancho de banda relativo BW del Lock-In Amplifier. Para ello, se realizó la transformada de Fourier de la señal generada del puerto Out con amplitud de 100 mV Vpk en potencias de 10 Hz mediante un osciloscopio, empezando desde 100 Hz hasta los 10 MHz, como se puede apreciar desde la Figura 12 hasta la Figura 18.

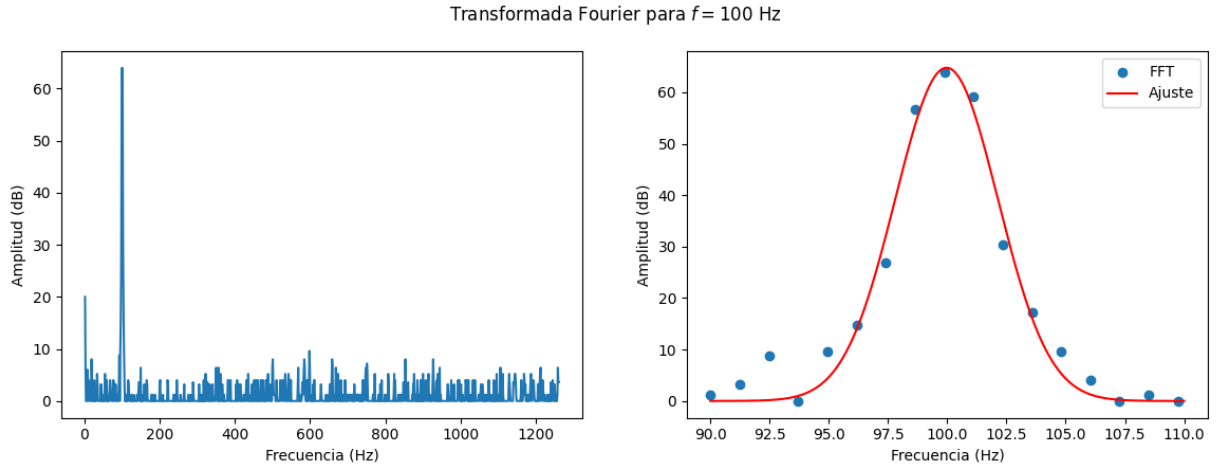


Figura 12: (a) Transformada de Fourier para una frecuencia f de 100 Hz. (b) Transformada de Fourier ampliada cerca de la frecuencia central de 100 Hz junto al ajuste realizado de una función gaussiana para los puntos de la FFT.

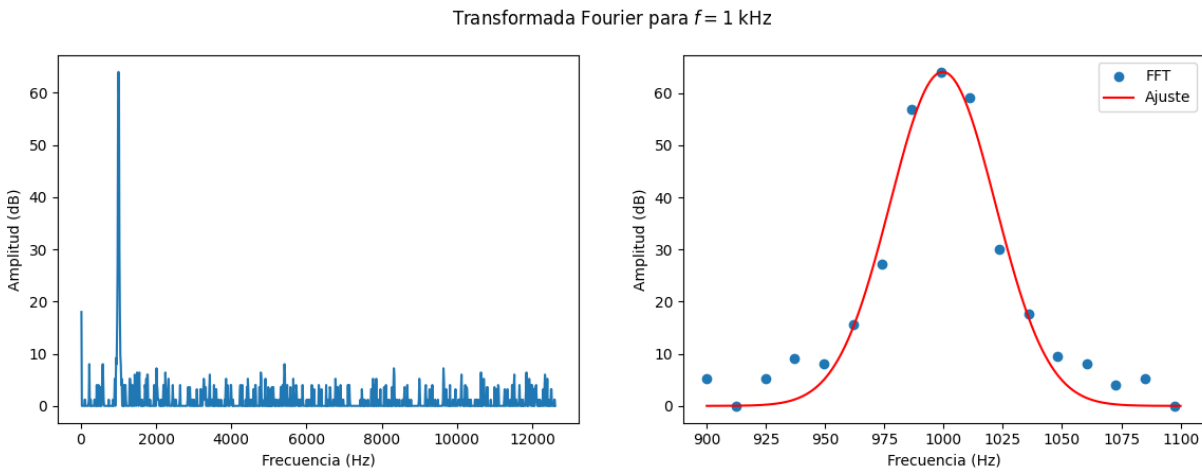


Figura 13: (a) Transformada de Fourier para una frecuencia f de 1 kHz. (b) Transformada de Fourier ampliada cerca de la frecuencia central f de 1 kHz junto al ajuste realizado de una función gaussiana para los puntos de la FFT.

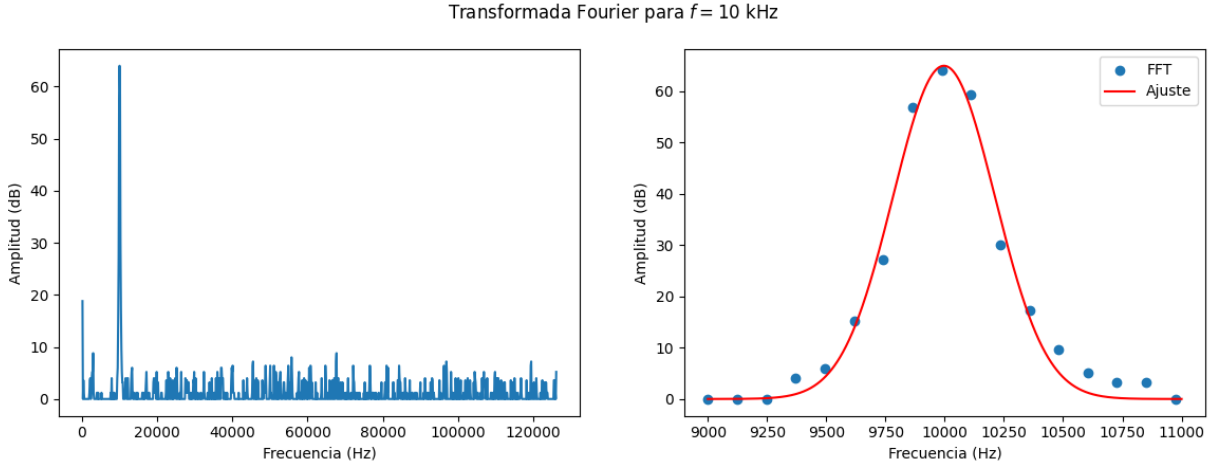


Figura 14: (a) Transformada de Fourier para una frecuencia f de 10 kHz. (b) Transformada de Fourier ampliada cerca de la frecuencia central f de 10 kHz junto al ajuste realizado de una función gaussiana para los puntos de la FFT.

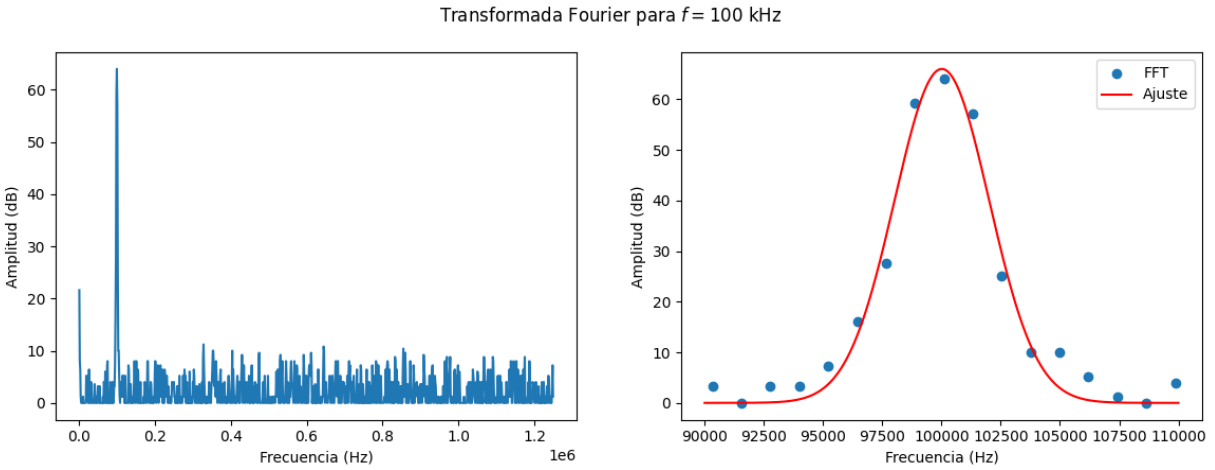


Figura 15: (a) Transformada de Fourier para una frecuencia f de 100 kHz. (b) Transformada de Fourier ampliada cerca de la frecuencia central f de 100 kHz junto al ajuste realizado de una función gaussiana para los puntos de la FFT.

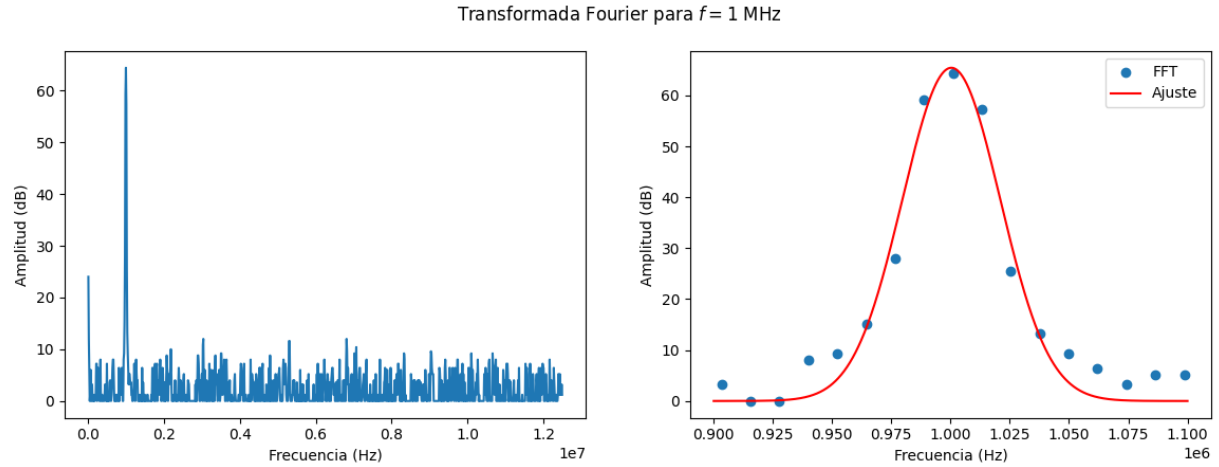


Figura 16: (a) Transformada de Fourier para una frecuencia f de 1 MHz. (b) Transformada de Fourier ampliada cerca de la frecuencia central f de 1 MHz junto al ajuste realizado de una función gaussiana para los puntos de la FFT.

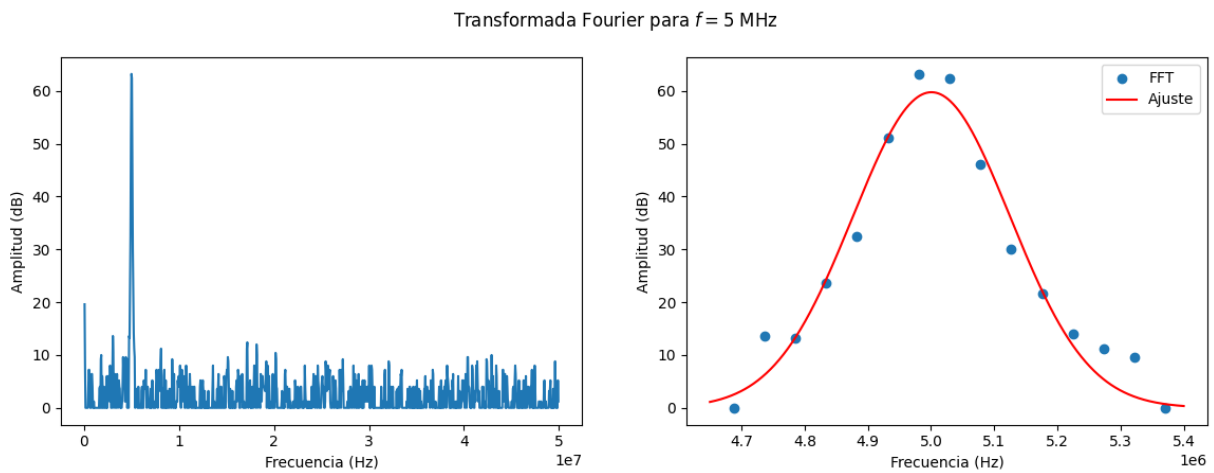


Figura 17: (a) Transformada de Fourier para una frecuencia f de 5 MHz. (b) Transformada de Fourier ampliada cerca de la frecuencia central f de 5 MHz junto al ajuste realizado de una función gaussiana para los puntos de la FFT.

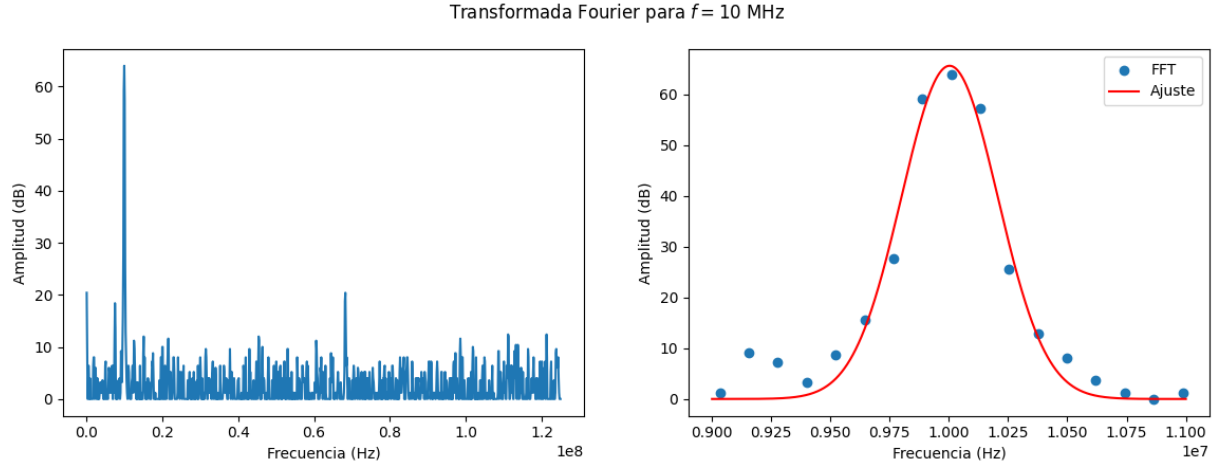


Figura 18: (a) Transformada de Fourier para una frecuencia f de 10 MHz. (b) Transformada de Fourier ampliada cerca de la frecuencia central f de 10 MHz junto al ajuste realizado de una función gaussiana para los puntos de la FFT.

Se puede apreciar que cada una de las transformadas de Fourier presentan un pico en las frecuencias consideradas. Con base en lo anterior, se amplió la transformada de Fourier en cada una de las frecuencias centrales para poder estimar el ancho del pico y calcular, consecuentemente, el ancho de banda relativo BW. Para ello, se ajustó la siguiente función gaussiana

$$r(f) = Ae^{-(f-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad (2)$$

donde A es el factor de escalamiento, μ es la media y σ es la desviación estándar. De la Figura 12 hasta la Figura 18 se puede apreciar que el ajuste realizado logra modelar la tendencia de los datos de la transformada de Fourier. No obstante, en algunas Figuras como en la Figura 12, la Figura 13, la Figura 16 y la Figura 18, se puede evidenciar que algunos datos de la transformada de Fourier no se corresponden con las colas de la función gaussiana estimada. Esto se debe en parte al ruido propio del osciloscopio empleado (el cuál es del orden de 10 dB) y a la poca cantidad de datos que se tienen para reproducir los picos encontrados en cada una de las transformadas de Fourier.

Posteriormente, se procedió a calcular el ancho de banda relativo BW como

$$BW = \frac{\Delta f}{f_{\text{central}}}, \quad (3)$$

donde f_{central} viene a ser la frecuencia central de la transformada de Fourier y Δf el ancho del pico. Para

calcular Δf se considero las frecuencias en las cuales la amplitud máxima se veía disminuida en un factor de $\sqrt{2}$. Tomando lo anterior en consideración, se encuentra que las frecuencias que cumplen la condición vienen dadas por $f = \mu \pm \sigma\sqrt{\ln 2}$. En consecuencia, Δf sería igual a $\Delta f = 2\sigma\sqrt{\ln 2}$ y el ancho de banda relativo BW se calcularía como

$$BW = \frac{2\sigma\sqrt{\ln 2}}{f_{\text{central}}}. \quad (4)$$

Una vez obtenida esta expresión, se calculó y graficó el ancho de banda relativo BW para cada una de las frecuencias consideradas en las transformadas de Fourier, obteniendo la Figura 19.

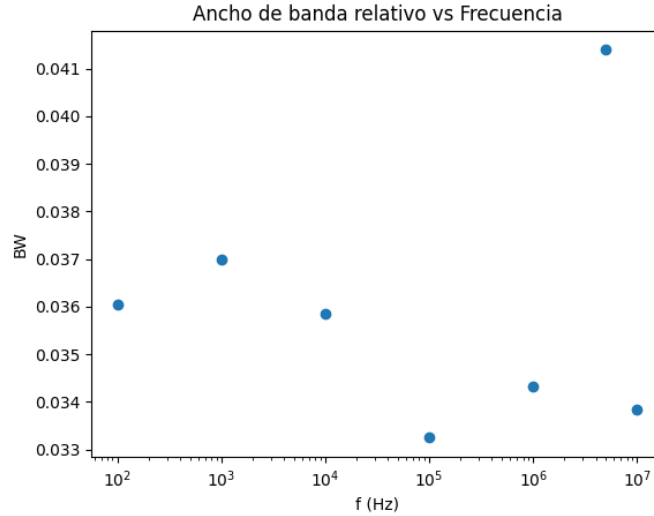


Figura 19: Ancho de banda relativo BW en función de las frecuencias de corte f_{central} .

En la Figura 19 se puede apreciar que el ancho de banda relativo BW no tiene una tendencia clara en función de las frecuencias centrales consideradas, lo cuál es lo esperado. Ya que la frecuencia central f_{central} y la desviación estándar σ calculada en las funciones gaussianas presentan el mismo orden de magnitud. Por consiguiente, para estimar un valor del ancho de banda relativo BW, se determinó el promedio y la desviación estándar de los datos encontrados, obteniendo un valor de $BW = 0,036 \pm 0,002$.

A continuación se procedió a medir la señal de entrada +In y la señal de salida Out por separado al conectarlos con los puertos Top y Bottom de la caña en G-10, respectivamente. Para ello, se configuró un barrido de frecuencias desde 0 Hz hasta 10 MHz en el puerto Out con una amplitud de 100 mV Vpk. En primera instancia, se obtuvo la señal en la Figura 20 al medir la señal proveniente de la conexión entre el puerto +In, el puerto Top de la caña en G-10 y un osciloscopio mediante un conector T de tipo SMA.

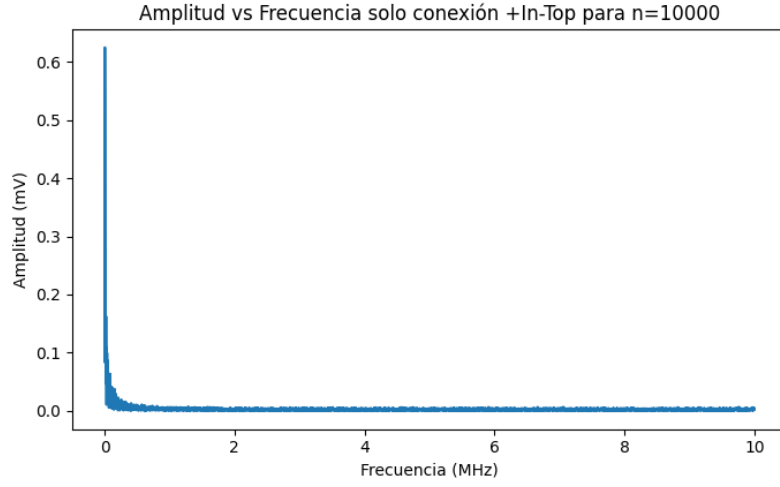


Figura 20: Amplitud r en función de la frecuencia f de la señal producto de la conexión del puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10 para un barrido de $n = 10000$ puntos desde 0 Hz hasta 10 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s.

Es de notar que la Figura 20 presenta el mismo comportamiento de la Figura 6. Para apreciar esto, en la Figura 21 se puede observar la comparativa realizada entre la amplitud r dada solo por el puerto +In y la amplitud r dada por la conexión del puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10.

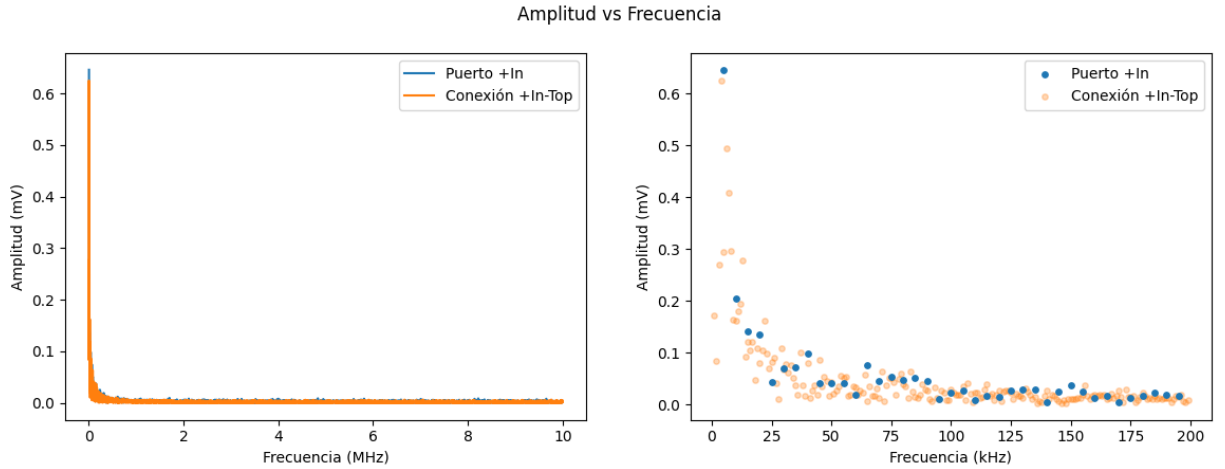


Figura 21: (a) Amplitud r en función de la frecuencia f de la señal del puerto +In y la señal de la conexión del puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10. (b) Amplitud r en función de la frecuencia f de las señales anteriores ampliadas para el intervalo de 0 a 200 kHz.

En la Figura 21 (a) se puede ver que las amplitudes de las señales consideradas se superponen, por lo tanto, para explorar la tendencia de las señales cerca del pico, se considero la amplitud r para el rango de 0 a 200 kHz, lo cuál se muestra en la Figura 21 (b). Se puede apreciar que ambas señales presentan la misma

tendencia para el rango de 0 a 200 kHz. Por consiguiente, se puede extrapolar el análisis realizado de la amplitud del puerto +In para la amplitud de la señal producto de la conexión entre el puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10.

Del mismo modo, se obtuvo la señal en la Figura 22 al medir la señal proveniente de la conexión entre el puerto Out, el puerto Bottom de la caña en G-10 y un osciloscopio mediante un conector T de tipo SMA.

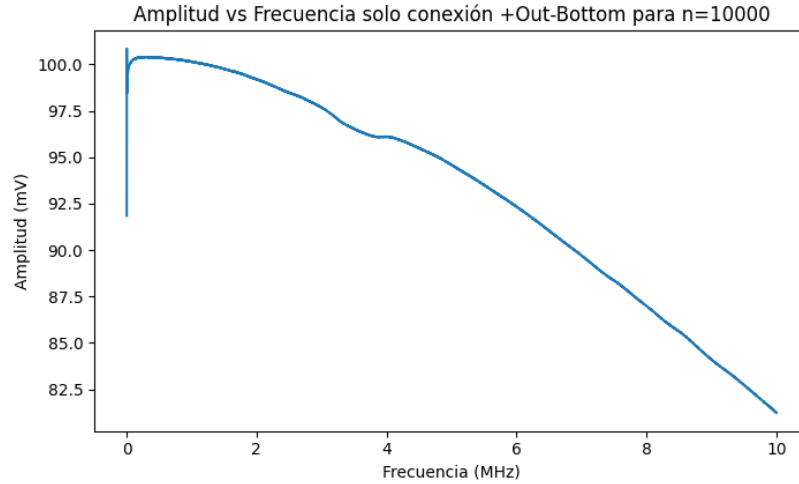


Figura 22: Amplitud r en función de la frecuencia f de la señal producto de la conexión del puerto Out con el puerto Bottom de la caña en G-10 para un barrido de $n = 10000$ puntos desde 0 Hz hasta 10 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s.

Es de notar que la Figura 22 presenta un comportamiento diferente al analizado en la Figura 10 y Figura 11 para el intervalo desde 0 Hz hasta 10 MHz. Para describir este cambio, en la Figura 23 se puede observar la comparativa realizada entre la amplitud r dada solo por el puerto Out y la amplitud r dada por la conexión del puerto Out con el puerto Bottom de la caña en G-10.

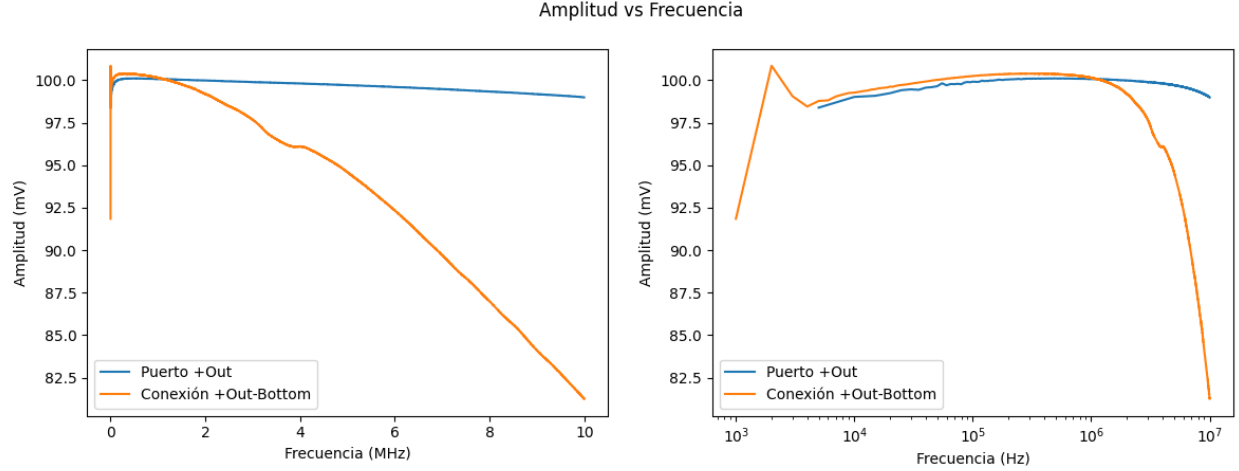


Figura 23: (a) Amplitud r en función de la frecuencia f de la señal para el puerto Out y la conexión del puerto Out con el puerto Bottom de la caña en G-10. (b) Amplitud r en función de la frecuencia f de las señales anteriores donde el eje de la frecuencia presenta una escala logarítmica.

De la Figura 23 se puede evidenciar que, para la conexión Out-Bottom, la amplitud disminuye considerablemente respecto a la señal obtenida solo por el puerto Out para el rango de 0 Hz hasta 10 MHz. Para estimar esta reducción, se realizó el mismo plot tomando una escala logarítmica para el eje de las frecuencias, lo cuál se puede observar en la Figura 23 (b). A partir de esto se encuentra que desde los 1 MHz hasta los 10 MHz se produce una reducción en la amplitud de $\Delta r = 18,75$ mV. Esta reducción surge a causa de incluir más elementos en el circuito por donde se transmite la señal inicial de salida del puerto Out.

Una vez realizadas las medidas por separado, se completo el montaje experimental presentado en la Figura 1. Para ello, se colocaron los dos transductores piezoeléctricos en contacto y se conectó el puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10, así como el puerto Out y el puerto Bottom de la caña en G-10. A continuación, se configuró un barrido de frecuencias desde 0 Hz hasta 10 MHz en el puerto Out con una amplitud de 100 mV Vpk. En primera instancia, se obtuvo la señal de la conexión del puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10, la cuál se presenta en la Figura 24.

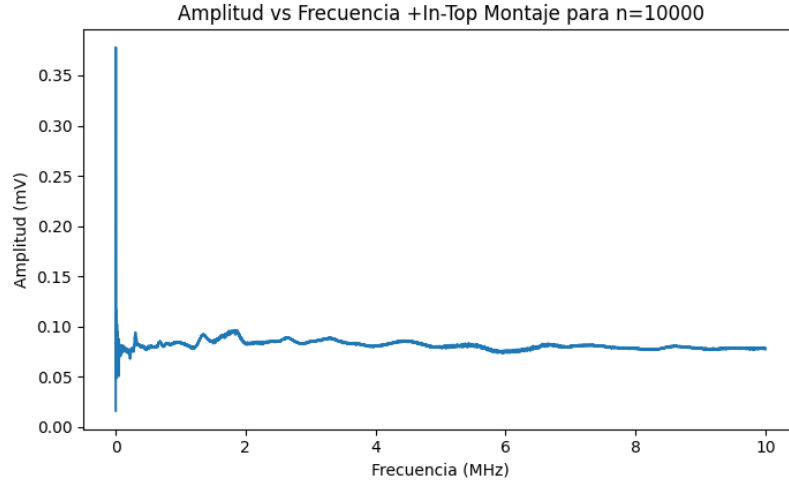


Figura 24: Amplitud r en función de la frecuencia f de la señal proveniente de la conexión del puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10 al completar el montaje para la Espectroscopia de Resonancia Ultrasónica en Sólidos (RUS). La señal fue obtenida al realizar un barrido de $n = 10000$ puntos desde 0 Hz hasta 10 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s.

De la Figura 24 se puede observar que el comportamiento de la amplitud de la conexión del puerto +In con el puerto Top al completar el montaje es diferente al de las señales analizadas en la Figura 6 y la Figura 20. La amplitud r en todo el espectro presenta múltiples variaciones. Sin embargo, esta tiende a ser constante ya que, ignorando el pico inicial, la amplitud suele encontrarse entre los 0.05 mV y los 0.1 mV. Con base en lo anterior, del código realizado se encontró que la amplitud media en el espectro de 4 kHz hasta 10 MHz es de $\bar{r} = 0,081 \pm 0,004$ mV.

Por otra parte, en la Figura 25 se puede observar la comparativa realizada entre las 3 diferentes amplitudes asociadas al puerto +In que fueron medidas y analizadas en el presente trabajo.

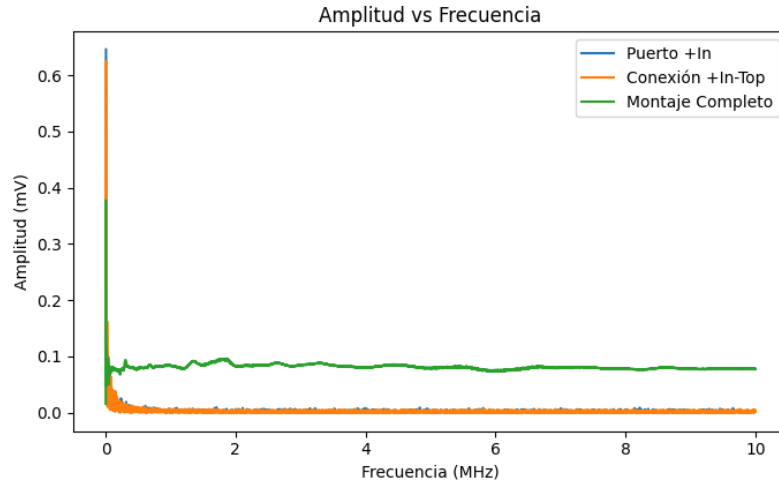


Figura 25: Amplitud r en función de la frecuencia f desde 0 Hz hasta 10 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s de las señales provenientes de las siguientes conexiones: solo del puerto +In, puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10 y puerto +In con el puerto Top de la caña en G-10 al completar el montaje de RUS.

De la misma manera, se obtuvo la señal del puerto Out y el puerto Bottom de la caña en G-10 al completar el montaje experimental para RUS, la cuál se presenta en la Figura 26.

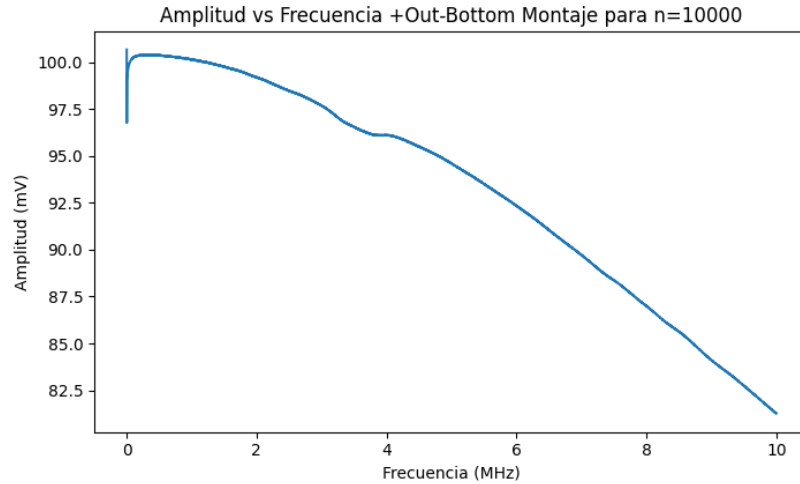


Figura 26: Amplitud r en función de la frecuencia f de la señal proveniente de la conexión del puerto Out con el puerto Bottom de la caña en G-10 al completar el montaje para la Espectroscopia de Resonancia Ultrasónica en Sólidos (RUS). La señal fue obtenida al realizar un barrido de $n = 10000$ puntos desde 0 Hz hasta 10 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s.

Se puede apreciar que la señal de la Figura 26 no cambia en gran medida con la señal analizada en la Figura 22. Además, en la Figura 27 se puede observar la comparativa realizada entre las 3 diferentes amplitudes

asociadas al puerto Out que fueron medidas a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

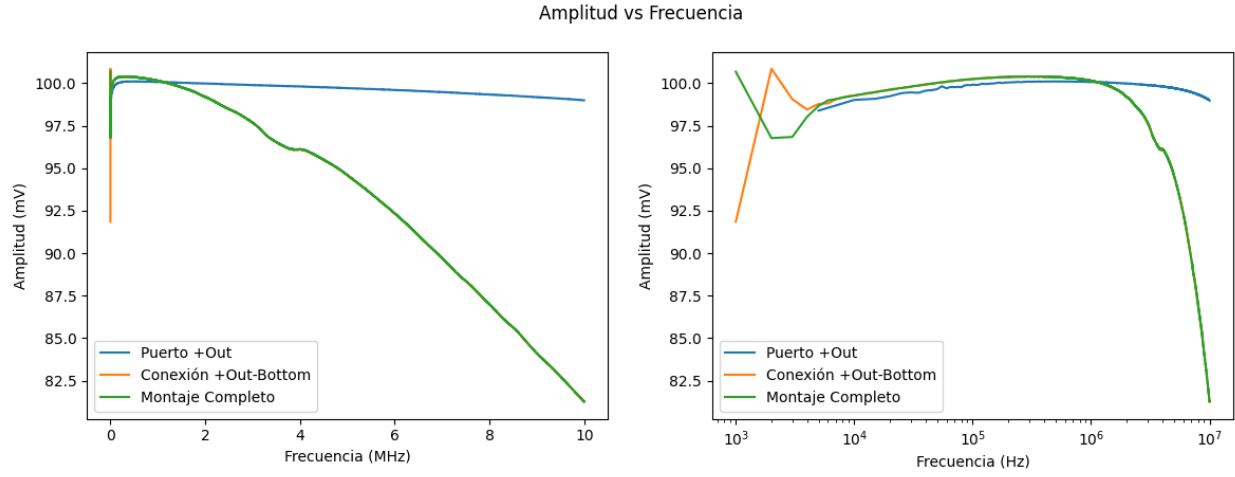


Figura 27: Amplitud r en función de la frecuencia f desde 0 Hz hasta 10 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s de las señales provenientes de las siguientes conexiones: solo del puerto Out, puerto Out con el puerto Bottom de la caña en G-10 y puerto Out con el puerto Bottom de la caña en G-10 al completar el montaje de RUS.

8.3. Comparación de las propiedades eléctricas entre el Lock-In Amplifier HF2LI y el RedPitaya STEMLab 125-14

Para el desarrollo de esta sección se tomaron las gráficas finales de las tres señales asociadas a los puertos In y Out de la sección anterior pero para el RedPitaya ². En la Figura 28 se muestra la comparativa realizada entre las tres diferentes amplitudes asociadas al puerto Input del RedPitaya.

²Las gráficas que se siguen a continuación fueron elaboradas y caracterizadas con mayor profundidad en un proyecto en paralelo que busca caracterizar el RedPitaya siguiendo una metodología similar a la de este proyecto.

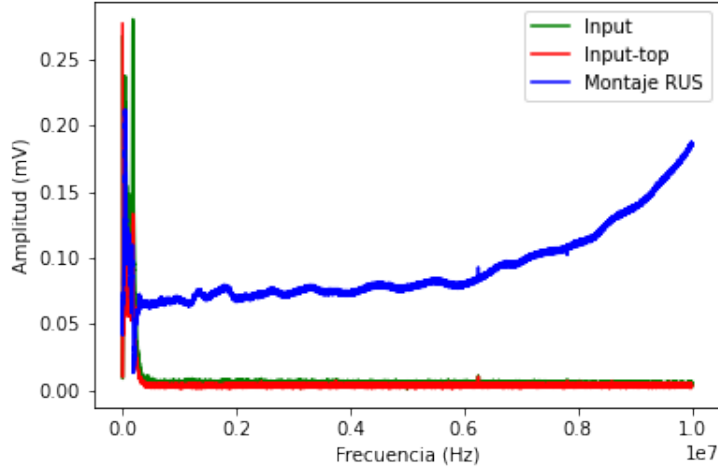


Figura 28: Amplitud r en función de la frecuencia f desde 0 Hz hasta 10 MHz de las señales obtenidas del RedPitaya provenientes de las siguientes conexiones: solo del puerto Input, puerto Input con el puerto Top de la caña en G-10 y puerto Input con el puerto Top de la caña en G-10 al completar el montaje de RUS.

En la Figura 28 se puede apreciar que las señales de amplitud para el Input y la conexión del Input con el puerto Top de la caña en G-10 presentan un comportamiento similar a las del Lock-In Amplifier. No obstante, para bajas frecuencias, se nota la presencia de unos picos con un comportamiento diferente a los picos del Lock-In Amplifier, ya que estos no decaen a medida que aumenta la frecuencia, sino que presentan un ancho.

Asimismo, en la Figura 28 se puede observar que el comportamiento de la amplitud de la señal proveniente de la conexión del Input con el puerto Top de la caña en G-10 al completar el montaje de RUS presenta un comportamiento totalmente diferente a la del Lock-In Amplifier. Esto se debe a que a medida que aumenta la frecuencia, la señal del RedPitaya va a aumentando su amplitud. Por el contrario, en la Figura 24 se puede apreciar que la señal de amplitud del Lock-In Amplifier de la conexión del In con el puerto Top de la caña en G-10 al completar el montaje de RUS presenta un comportamiento aproximadamente constante.

Por otro lado, en la Figura 29 se presenta la comparativa realizada entre las 3 diferentes amplitudes asociadas al puerto Output del RedPitaya.

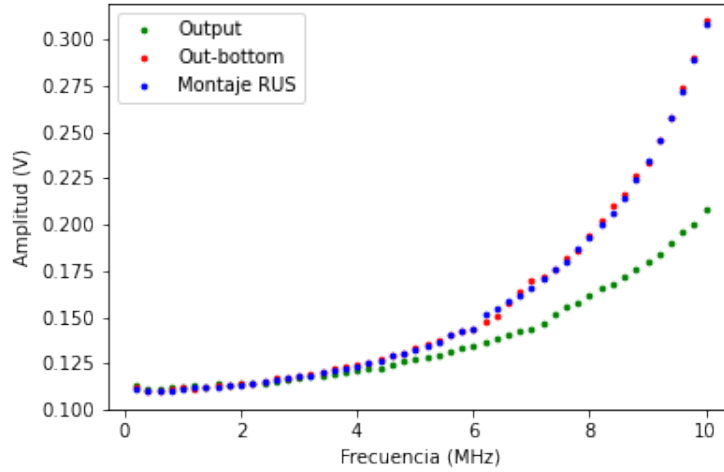


Figura 29: Amplitud r en función de la frecuencia f desde 0 Hz hasta 10 MHz a una tasa de transferencia de 7.2 kSa/s de las señales provenientes de las siguientes conexiones: solo del puerto Output, puerto Output con el puerto Bottom de la caña en G-10 y puerto Output con el puerto Bottom de la caña en G-10 al elaborar el montaje completo para RUS.

De la Figura 29 se puede apreciar que el comportamiento de las amplitudes para las tres señales asociadas al Output del RedPitaya es opuesto al comportamiento de las tres señales asociadas al Out del Lock-In Amplifier. En la la Figura 29 se observa que a medida que se aumenta la frecuencia, las señales asociadas al Output del RedPitaya aumentan su amplitud. Por el contrario, en la Figura 27 se puede apreciar que las 3 señales de amplitud del Lock-In Amplifier asociadas al puerto Out disminuyen su amplitud a medida que aumenta la frecuencia.

Al realizar la comparación entre las gráficas de las 3 señales analizadas del Lock-In Amplifier (Figura 25 y Figura 27) con las del RedPitaya (Figura 28 y Figura 29), se puede evidenciar que para el puerto de entrada, el Lock-In Amplifier presenta un mejor desempeño. Esto se debe a que, en experimentos de RUS, se busca que la señal de entrada tenga la menor amplitud posible, con el objetivo de poder diferenciar los picos a la hora de realizar el experimento con muestras reales.

Sin embargo, para el puerto de salida no se puede considerar que el Lock-In Amplifier o el RedPitaya presenten un mejor desempeño que el otro. Esto se debe a que ambos dispositivos podrían ser utilizados en experimentos con diferentes propósitos, ya sea que se requiera que la señal de salida disminuya o aumente a medida que la frecuencia aumenta.

9. Conclusiones

En este proyecto se caracterizó el dispositivo Lock-In Amplifier HF2LI perteneciente a la Universidad de los Andes para la operación de Espectroscopia de Resonancia Ultrasónica en Sólidos (RUS). Para ello, se analizaron las propiedades eléctricas del Lock-In Amplifier. Se presentó un desarrollo que permitió comprender el comportamiento de las señales de los puertos +In y Out en diferentes etapas, buscando caracterizar cada una de las pre-etapas hasta completar el montaje de RUS. Se consiguió estimar el ruido eléctrico del puerto de entrada +In así como el ancho de banda relativo BW de la señal obtenida del puerto de salida Out. De igual modo, se propuso un protocolo de comunicación entre el Lock-In Amplifier HF2LI y el equipo presente en el laboratorio de Materiales Cuánticos que permitirá en un próximo desarrollo la realización de experimentos de RUS en función de la temperatura. Por último, se pudo comparar el desempeño de los puertos de entrada y salida del Lock-In Amplifier y del RedPitaya STEMLab 125-14 perteneciente a la Universidad de los Andes, encontrando que el puerto de entrada del Lock-In Amplifier exhibe un mejor desempeño que el puerto de entrada del RedPitaya STEMLab 125-14. Sin embargo, no se evidenció un mejor desempeño entre los puertos de salida debido a los comportamientos dispares entre el puerto de salida del Lock-In Amplifier y del RedPitaya.

10. Trabajo Futuro

Como la caracterización propuesta en este proyecto tiene el objetivo de servir como soporte para experimentos de RUS con el Lock-in Amplifier HF2LI en función de la temperatura, se nombra a continuación los posibles próximos desarrollos que preceden al presente trabajo realizado.

En primera instancia, se debería implementar el protocolo de comunicación desarrollado en la Sección 8.1. Para ello, se hace necesario la elaboración e implementación de un programa en LabVIEW que permita controlar el Lock-In Amplifier a partir de la API de LabVIEW propia de LabOne. Por otro lado, se debería seguir explorando las propiedades eléctricas del Lock-In Amplifier para señales con diferentes amplitudes V_{pk} , haciendo especial énfasis en el ancho de banda relativo BW. Por último, se deberían caracterizar muestras de prueba de las cuales se conozca su amplitud r en función de la frecuencia f , esto con vistas en evaluar el desempeño del Lock-In Amplifier con la caña G-10 en un experimento de RUS.

Referencias

- [1] N. Ashcroft and N. D. Mermin. *Solid State Physics*. Ed Saunders College Publishing, 1976.
- [2] M. Saint-Paul and P. Monceau. Survey of the thermodynamic properties of the charge density wave systems. *Advances in Condensed Matter Physics*, vol. 2019:p. 1–14, 2019.
- [3] F. F. Balakirev, S. M. Ennaceur, R. J. Migliori, B. Maiorov, and A. Migliori. Resonant ultrasound spectroscopy: The essential toolbox. *Review of Scientific Instruments*, vol. 90(no. 12):p. 1–14, 2019.
- [4] T. Lee, R. S. Lakes, and A. Lal. Resonant ultrasound spectroscopy for measurement of mechanical damping: Comparison with broadband viscoelastic spectroscopy. *Review of Scientific Instruments*, 2000.
- [5] A. Migliori and J. D. Maynard. Implementation of a modern resonant ultrasound spectroscopy system for the measurement of the elastic moduli of small solid specimens. *Review of Scientific Instruments*, page p. 1–7, 2005.
- [6] Y. Hernández Charpak. Implementación de un experimento de espectroscopía de resonancia ultrasónica en la universidad de los andes. Tesis de pregrado, Uniandes, 2020.
- [7] J. Rodríguez. Medición del espectro de resonancias mecánicas de materiales cuánticos a partir de espectroscopía de resonancia ultrasónica. Tesis de pregrado, Uniandes, 2021.
- [8] G. A. Stimpson, M. S. Skilbeck, R. L. Patel, B. L. Green, and G. W. Morley. An open-source high-frequency lock-in amplifier. *Review of Scientific Instruments*, 90(9):094701, 2019.
- [9] Zurich Instruments. Hf2li 50 mhz lock-in amplifier, 2022. <https://www.zhinst.com/americas/en/products/hf2li-lock-in-amplifier#resources>.
- [10] RedPitaya. Stemplab 125-14 technical specifications, 2021. <https://redpitaya.com/stemplab-125-14/>.
- [11] Zurich Instruments. Labone programming manual: Labview programming, 2022. https://docs.zhinst.com/labone_programming_manual/labview.html.
- [12] Zurich Instruments. Labone programming manual: Labone api programming, 2022. https://docs.zhinst.com/labone_programming_manual/labone_api_programming.html.