

# PRACTICA 5

Duban Yesid Cortés Tabares – 2214644

Elkin Yesid Lozada Cabrera - 2204219

## PRACTICA 5 A

### PARTE 1

En esta actividad se analizaron tres formas de onda distintas como señales de mensaje: senoidal, diente de sierra y triangular, para estudiar su modulación PAM por muestreo natural, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia. Se utilizó una frecuencia de muestreo de pulsos de 1000 Hz, cumpliendo así la relación recomendada  $\text{samp\_rate}/f_s = 100$ .

Dado que la frecuencia de los pulsos es de 1 kHz, el período entre ellos es de 1 ms. Con base en esto, el ancho de los impulsos debe ser significativamente menor que dicho período para evitar solapamientos y asegurar una representación clara de la señal; por lo tanto, el parámetro de ancho de pulso puede variar entre 0 ms y un máximo de 0.5 ms.

Se comienza con una señal cosenoidal con parámetros frecuencia de mensaje de 20 Hz, un ancho de pulso de 0.35 ms y una amplitud de 1.

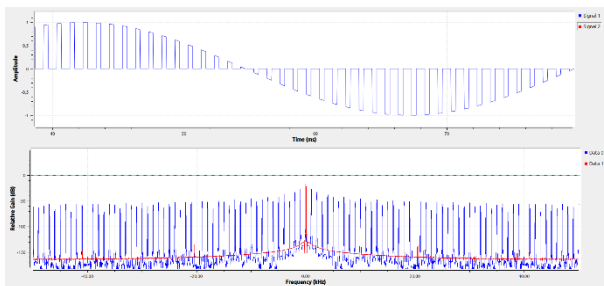


Figura 1. Señal de entrada de forma senoidal.

$$\text{Ciclo util (\%)} = \left( \frac{\text{Ancho del pulso}}{\text{Periodo tren de pulsos}} \right) * 100$$

Con esta fórmula se puede calcular el ciclo útil de la señal, que en este caso corresponde al 35%. Además, al analizar la relación entre la frecuencia de los pulsos y la frecuencia del mensaje, se determina que hay 50 muestras por cada ciclo del mensaje.

A continuación, se utiliza como señal de entrada una señal diente de sierra, con los siguientes parámetros: frecuencia de mensaje de 10 Hz, ancho de pulso de 0.1 ms y amplitud de mensaje igual a 1.

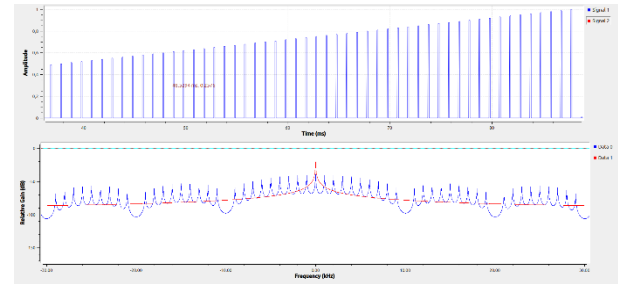


Figura 2. Señal de entrada de forma dientes de sierra.

Para esta señal, se obtiene un ciclo útil del 10% y un total de 100 muestras por ciclo del mensaje.

Por último, se utilizó como señal de entrada una onda triangular con una frecuencia de mensaje de 20 Hz, un ancho de pulso de 0.25 ms y una amplitud de 1.

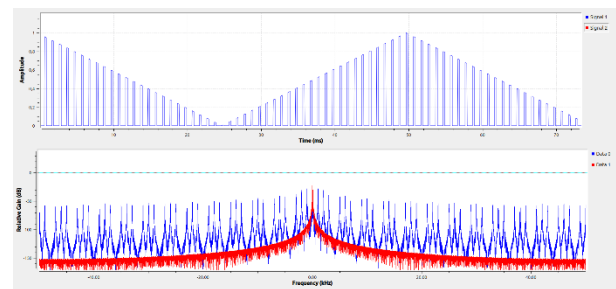


Figura 3. Señal de entrada de forma triangular.

Para esta señal, se obtuvo un ciclo útil del 25% y un total de 50 muestras por cada ciclo de la señal de mensaje.

Al analizar la señal en el dominio de la frecuencia, se observa que la curva roja representa el espectro de la señal de mensaje original, mientras que la curva azul corresponde al espectro de la señal de pulsos modulada. En este caso, el espectro de la señal original se replica cada 1 kHz, lo cual se debe a la frecuencia de repetición de los pulsos.

Además, el ancho de los pulsos influye directamente en la forma del espectro: pulsos más estrechos provocan que los ceros del espectro estén más separados, lo que resulta en un espectro más ancho; en cambio, pulsos más anchos acercan los ceros entre sí, generando un espectro más estrecho.

Gráficamente, esto se traduce en que, al disminuir el ancho del pulso, los ceros del espectro se desplazan hacia frecuencias más altas, ampliando así el ancho

de banda. Como consecuencia, se observan más componentes espectrales significativas antes de que la energía de la señal decaiga a cero.

## PARTE 2

La multiplexación tiene como objetivo transmitir múltiples señales a través de un solo canal, aprovechando diferencias en frecuencia y ancho de banda. Esto permite que varias señales coexistan sin interferirse entre sí. Para llevar a cabo este proceso de manera efectiva, es fundamental ajustar cuidadosamente los retardos temporales, considerando tanto el ancho de los pulsos como la frecuencia de cada señal de mensaje.

Para estas señales, la frecuencia del mensaje es de 100 Hz. Como se transmiten 4 mensajes distintos mediante multiplexación por división de tiempo, el ancho del pulso se divide en cuatro partes iguales, es decir, en segmentos del 25%. De esta manera, utilizando el selector RX (demodulador), es posible recuperar cualquiera de las señales ubicándose en los instantes correspondientes: 25, 50 o 75, como se muestra en la siguiente imagen.

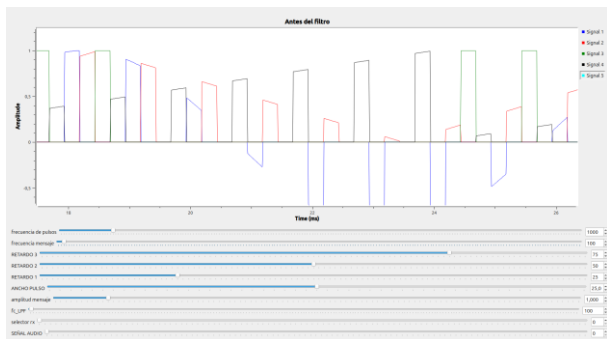


Figura 4. Multiplexación de 4 señales.

Ahora bien, si añadimos una señal de audio:

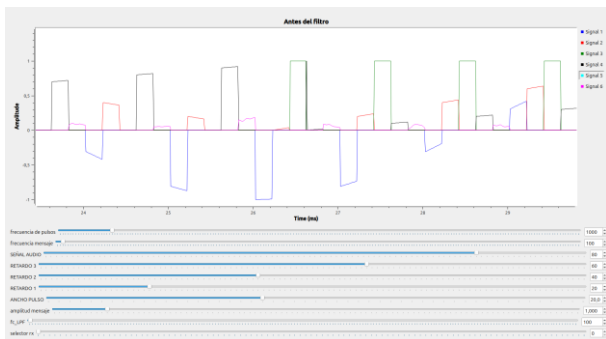


Figura 5. Multiplexación de 5 señales.

Aquí se puede observar que, al añadir una quinta señal (por ejemplo, una señal de audio), ahora se deben

multiplexar cinco señales en total. Esto implica ajustar los retardos para dividir el periodo en cinco partes iguales. Por lo tanto, los retardos deben espaciarse en intervalos de 20, ubicándose en los instantes 20, 40, 60, 80 respectivamente. De este modo, el demodulador puede recuperar cualquiera de las señales accediendo al retardo correspondiente.

## PARTE 3

Aunque el ancho de los impulsos pueda variar, los impulsos de cada canal no deben solaparse temporalmente con los de los demás canales. Esto implica que, para asegurar una correcta recuperación de cada canal, la suma del ancho máximo de los impulsos dentro de un período de muestreo debe ser menor o igual al tiempo total disponible para los cuatro canales en conjunto. La selección del canal a recuperar se realiza mediante la variable D4, que ajusta el desfase correspondiente a dicho canal.

Además, es necesario emplear un filtro pasa bajas para recuperar cualquiera de las señales de referencia. La frecuencia de corte de este filtro debe ser la mitad de la frecuencia de los pulsos. En este caso, dado que la frecuencia de pulsos utilizada es de 3906 Hz, la frecuencia de corte del filtro se establecerá en 1953 Hz.

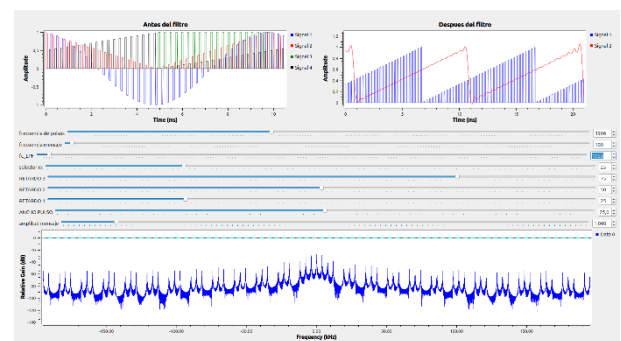


Figura 6. Señal triangular de referencia recuperada.

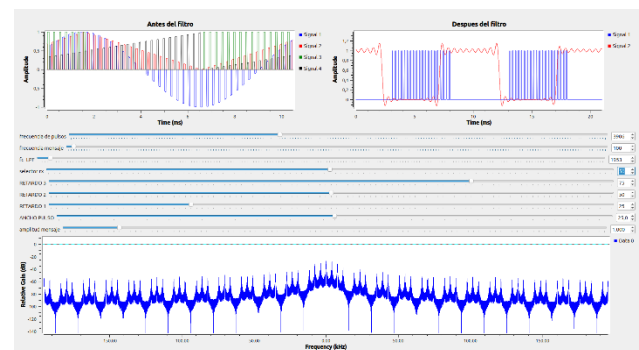
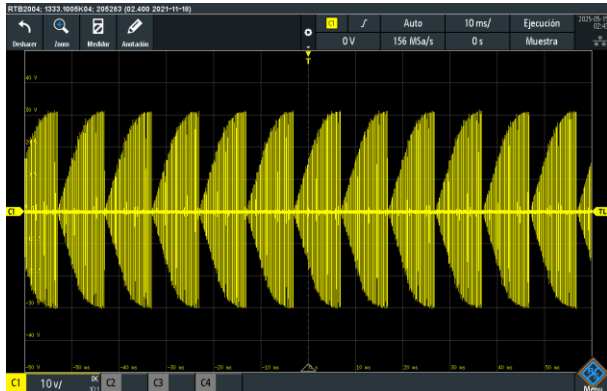


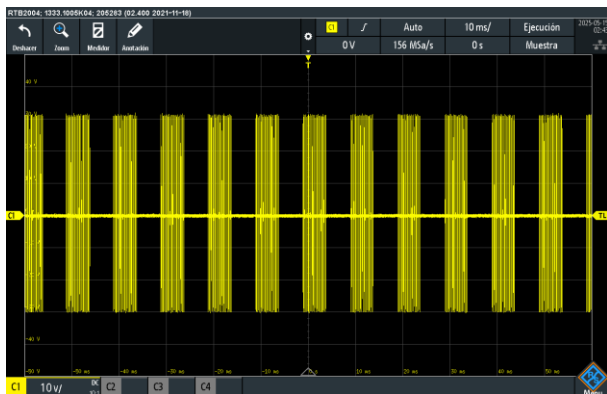
Figura 7. Señal cuadrada de referencia recuperada.

Con esto se verifica que, al utilizar el selector, la señal demodulada después del filtro varía según el valor seleccionado, lo que permite recuperar correctamente la señal deseada. Asimismo, la frecuencia de corte elegida para el filtro garantiza una recuperación adecuada de las señales de referencia.

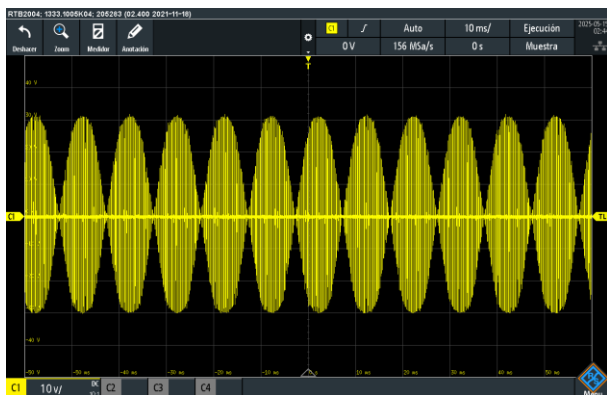
Se utilizó el USRP para generar las señales de referencia, las cuales fueron medidas y visualizadas en el osciloscopio luego de ser recuperadas.



**Figura 8.** Señal dientes de sierra medida con el osciloscopio.

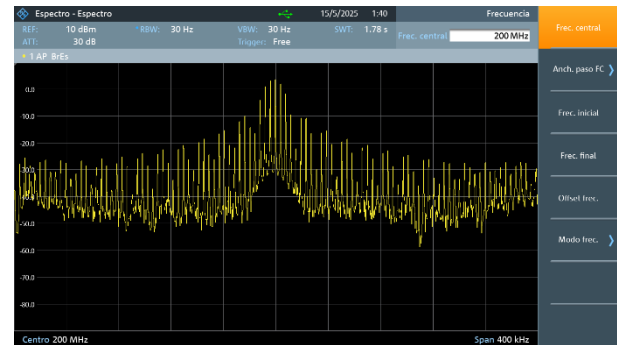


**Figura 9.** Señal cuadrada medida con el osciloscopio.

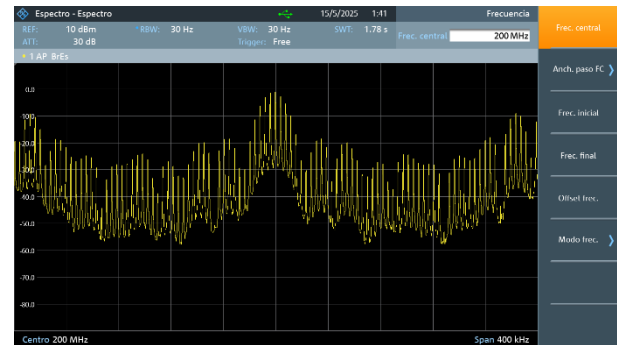


**Figura 10.** Señal triangular medida con el osciloscopio.

Luego se procedió a medir las señales de referencia con el analizador de espectro luego de ser recuperadas.



**Figura 11.** Señal cuadrada medida con el analizador de espectros.



**Figura 12.** Señal triangular medida con el analizador de espectros.

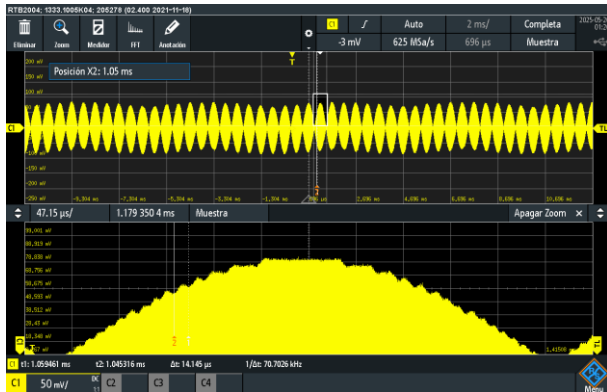
## PRACTICA 5 A

### PARTE 1

#### 1. ¿Cómo afecta la resolución del cuantizador a la calidad de la señal después de la cuantización?

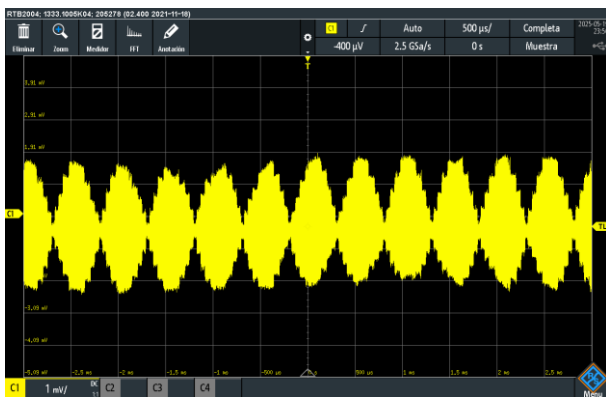
Para iniciar el análisis, se parte del conocimiento de que la señal generada en GNU Radio es una onda senoidal pura sin componente DC, como se muestra en la imagen GNU1.

Al observar la misma señal en el osciloscopio, configurada para una resolución de 5 bits, se aprecia que, aunque la forma general de la señal se conserva, se presentan diferencias notables, especialmente en los picos de la señal, donde se evidencia mayor distorsión.



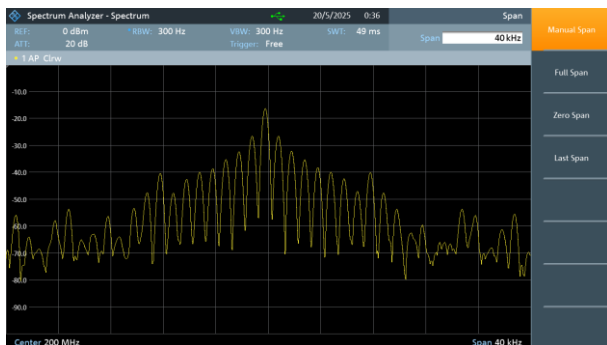
**Figura 13. Señal con 5 bits**

Al realizar la medición con una resolución de apenas 2 bits, se pueden observar claramente los niveles cuantizados de la señal. En este caso, la distorsión es considerablemente mayor, lo cual era de esperarse debido a la baja resolución, que limita la capacidad de representar con precisión la forma original de la onda senoidal.

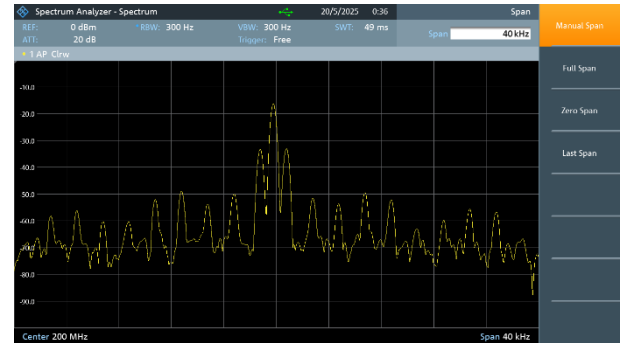


**Figura 14. Señal con 2 bits**

Ahora, analizando estos efectos en el analizador de espectros:



**Figura 15. Respuesta en frecuencia 1 bit.**



**Figura 16. Respuesta en frecuencia 12 bit.**

Se puede observar que, cuando la señal tiene una resolución de un solo bit, su forma se asemeja a un tren de pulsos, lo que genera una gran cantidad de armónicos en el dominio de la frecuencia. A medida que se incrementa la resolución en bits, el espectro se va depurando, y predominan únicamente los dos picos principales correspondientes a la señal senoidal original.

Además, al comparar señales cuantizadas con distintas resoluciones, por ejemplo, 3 bits frente a 5 bits, se nota que las amplitudes de los armónicos varían. Esto se debe a que, con menor resolución, ciertos valores de la señal se cuantizan por encima o por debajo de su valor real, generando errores de cuantización que se reflejan como distorsión espectral. Esta diferencia se aprecia claramente en las dos últimas figuras.

## 2. ¿Qué impacto tiene el ruido de cuantización en la señal procesada y cómo se puede minimizar?

Ahora bien, al hablar del error de cuantización, este puede evidenciarse claramente al comparar señales con diferentes niveles de resolución. Para ilustrarlo, se analizan dos casos extremos: una señal cuantizada con 1 bit y otra con 12 bits.



Figura 5. Señal a 1 bit.

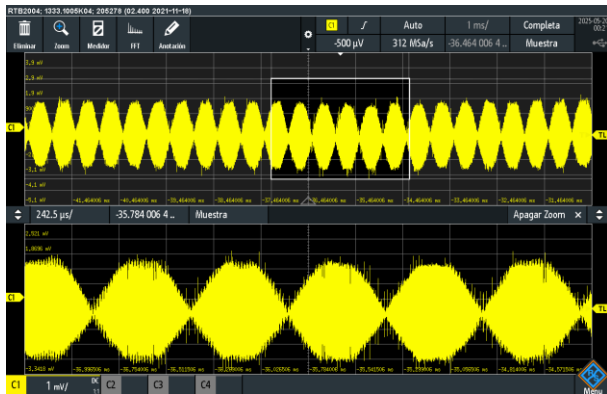


Figura 6. Señal a 12 bit.

Aquí se pueden observar claramente los niveles de cuantización para el caso de 1 bit, representados como escalones. La señal se aproxima a estos niveles tanto por encima como por debajo, incluso cuando el valor real está muy alejado, lo que genera una distorsión considerable. En cambio, con 12 bits, la señal reconstruida es prácticamente idéntica a la senoidal original, presentando solo una mínima cantidad de ruido.

Respecto a lo observado en el analizador de espectros, los resultados coinciden con lo mostrado en las figuras 3 y 4. Esto demuestra que la forma más efectiva de reducir el ruido de cuantización es aumentando la resolución, es decir, incrementando el número de bits utilizados.

### 3. ¿Cómo influye el ancho de banda del filtro pasabajas en la calidad de la señal después de la cuantización?

Para estudiar el efecto del ancho de banda del filtro, no es estrictamente necesario modificar directamente su ancho. Es suficiente con mantener el filtro original centrado en la frecuencia de la onda senoidal y, en su lugar, desplazar la señal fuera del ancho de banda del

filtro. Al hacer esto, se pierde parte del espectro de la señal, lo que produce un efecto equivalente a reducir el ancho de banda del filtro.

En este caso, al establecer una frecuencia de corte de 1 kHz, se obtiene una gráfica similar a la mostrada en la figura 3. Por lo tanto, el análisis del ruido se realizará utilizando la señal cuantizada a 1 bit.

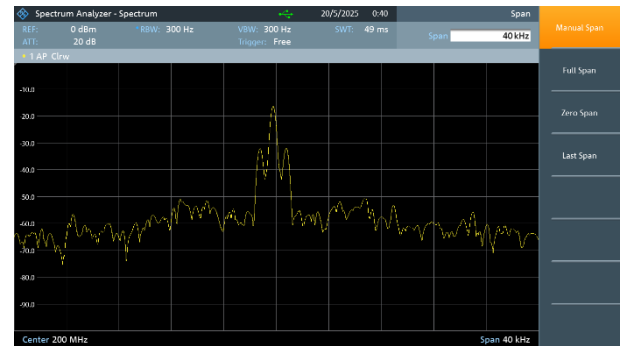


Figura 17. Señal con  $f_c = 16$  kHz.

Cabe aclarar que la señal medida en el analizador de espectros fue una señal de dientes de sierra, ya que al contener más armónicos permite observar con mayor claridad el efecto del filtro.

### 4. ¿De qué manera la adición de ruido gaussiano afecta el desempeño del cuantizador uniforme en GNU Radio?

Debido al ruido inherente presente en el sistema USRP – cable – adaptador – osciloscopio, no se observan diferencias significativas al aplicar ruido gaussiano directamente en las mediciones del osciloscopio. Sin embargo, este ruido debería generar errores aleatorios en la cuantización cuando una muestra supera el nivel correspondiente al delta medio. Por ejemplo, si en un instante la señal tiene un valor de 1 V y se le suma un error por ruido gaussiano de 0.3 V, y los niveles de cuantización son 0.9 V, 1.1 V y 1.3 V, el nivel seleccionado sería 1.3 V, afectando así la precisión de la señal cuantizada.

En contraste, las diferencias causadas por este ruido son mucho más evidentes en el analizador de espectros:



Figura 18. Señal con ruido gaussiano

En el analizador de espectros se puede observar que muchas de las componentes armónicas quedan atenuadas u ocultas debido a la presencia del ruido gaussiano. Como resultado, predominan únicamente las frecuencias centrales, mientras que las demás pierden intensidad o desaparecen visualmente en el espectro.

### 5. ¿Qué ventajas y desventajas tiene el uso de diferentes esquemas de cuantización en aplicaciones de procesamiento digital de señales?

Se puede observar que, al intentar reconstruir señales con variaciones abruptas, como la de dientes de sierra o la señal cuadrada, la recuperación no es completamente precisa, incluso utilizando la máxima resolución de 12 bits. Esto se debe, probablemente, a las transiciones bruscas características de estas señales, que dificultan una representación exacta mediante cuantización, especialmente en los instantes de cambio repentino.



Figura 19. Dientes de sierra 12 bits.

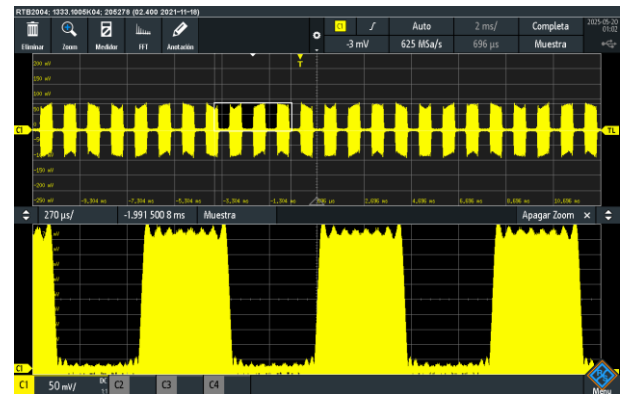


Figura 20. Señal cuadrada 12 bits.

### 6. Observe uno de los casos en el osciloscopio y documente lo observado (amplitudes, delta de amplitudes, delta de tiempos).



Figura 21. Medición de  $\Delta t$ .

Aquí se puede notar que, en los valores más bajos de la señal, el intervalo de tiempo entre muestras ( $\Delta t$ ) es aproximadamente constante, ya que la pendiente de la señal en esa región es prácticamente uniforme. En cambio, en los picos más altos, donde la pendiente disminuye, la cuantización tiende a mantenerse en un mismo nivel durante más de un  $\Delta t$ , lo que indica una menor variación de la señal en ese intervalo.

Para este caso, se tiene un  $\Delta t$  de 14,145  $\mu s$ .



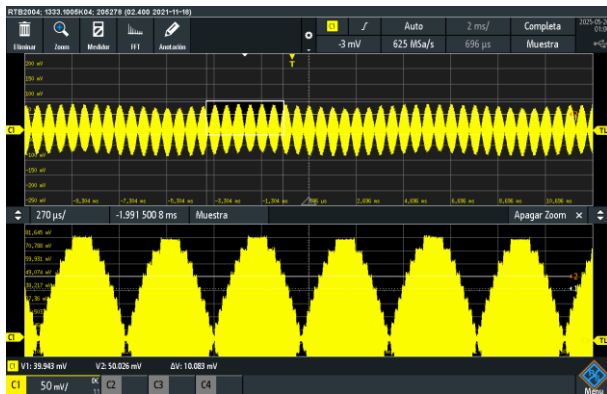


Figura 22. Medición 1  $\Delta$ Amplitud.

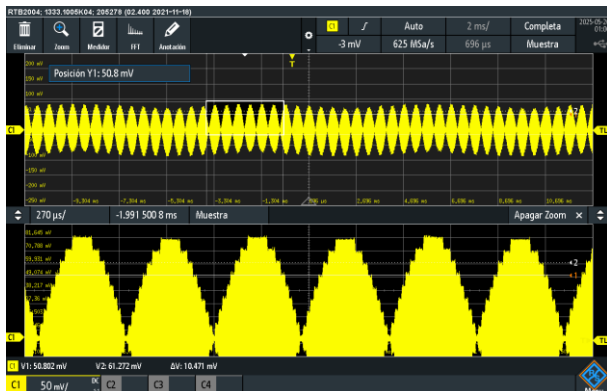


Figura 23. Medición 2  $\Delta$ Amplitud.

También se puede observar que el delta de amplitud entre niveles de cuantización es uniforme, con un valor aproximado de 10.5 mV. Esta uniformidad es característica de un sistema de cuantización lineal, donde los niveles están equidistantes, lo cual facilita el análisis y la reconstrucción de la señal.

7. Observe uno de los casos en el analizador de espectro y documente lo observado (ancho de banda, delta de frecuencia y potencia)



Figura 24. Medición de parámetros en frecuencia.

**Frecuencia central:** 200 MHz  
**Potencia:** -8.24 dBm

Delta de frecuencia entre componentes laterales (D2 y D3):

**Frecuencia de D2:** -1.007 kHz respecto a la portadora (lado izquierdo)

**Frecuencia de D3:** +1.007 kHz respecto a la portadora (lado derecho)

**Delta total (ancho de banda ocupado):**  
 $\Delta f = 2.014$  [kHz]

Potencia de los componentes laterales:

**D2:** -11.25 dB

**D3:** -11.34 dB

## PARTE 2

1. ¿Cómo influye el valor de la constante  $\mu$  en la distribución de los niveles de cuantización y la percepción del ruido de cuantización?

La constante  $\mu$  en la Ley U determina el grado de compresión logarítmica aplicado a una señal antes de su cuantización. A medida que,  $\mu$  aumenta, la compresión se intensifica: los valores de amplitud pequeños se expanden reciben mayor resolución, mientras que los valores grandes se comprimen reciben menor resolución.

Primero se hizo utilizar un  $\mu$  pequeño con valor de 1 y luego se llevó hasta 200 para así tener un contraste alto para poder observar las diferencias.

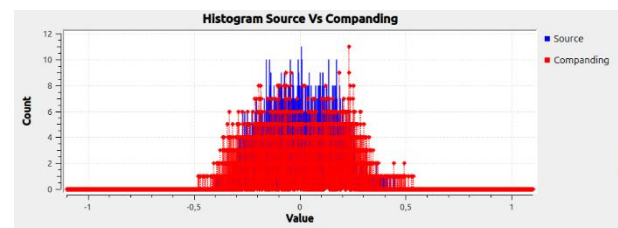
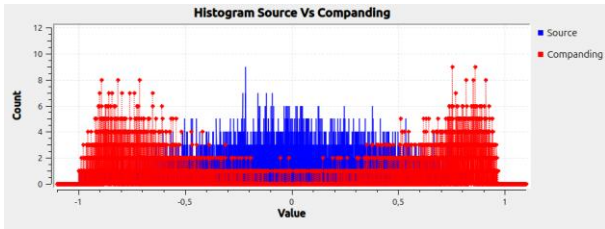


Figura 25. Histograma señal compandida con constante  $\mu = 1$ .

En este caso, la distribución de la señal compandida se asemeja mucho a la de la señal original, ya que apenas se aplica compresión. Como resultado, las amplitudes de la señal no se ven alteradas de forma significativa.



**Figura 26.** Histograma señal compandida con constante  $\mu = 200$ .

Como la compresión logarítmica es significativa, se concentran más niveles de cuantización en las amplitudes bajas y se comprimen las amplitudes altas. Como resultado, la señal compandida presenta una distribución mucho más uniforme en comparación con la señal original, que suele tener concentraciones de energía en ciertos rangos de amplitud.

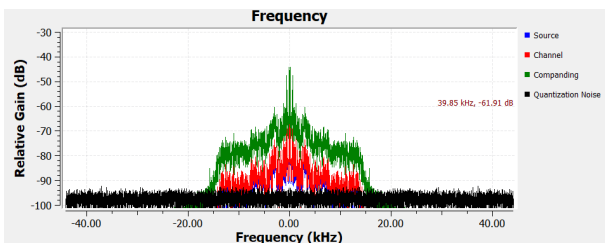
## 2. ¿Cuáles son las ventajas del cuantizador Ley U en comparación con la cuantización uniforme?

El cuantizador Ley U aplica una compresión logarítmica que asigna más niveles de cuantización a las amplitudes bajas de la señal. Esto permite una representación más precisa en las regiones donde los valores son pequeños.

Al utilizar pasos de cuantización más finos en estas regiones, se reduce el ruido de cuantización en los niveles bajos, lo que mejora la calidad de la señal. En consecuencia, la compresión logarítmica optimiza el uso de los niveles de cuantización, priorizando aquellas amplitudes donde el error sería más perceptible o perjudicial.

## 3. ¿Cómo afecta el ancho de banda del canal a la calidad de la señal cuantizada y qué implicaciones tiene para el ruido de cuantización?

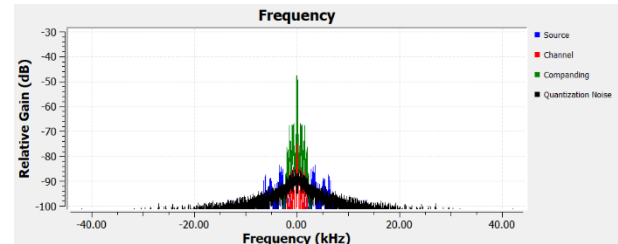
Para analizar cómo afecta el ancho de banda del canal a la señal cuantizada, se utilizó una frecuencia de muestreo de 16 kHz.



**Figura 27.** Espectro en frecuencia con  $\text{cutoff} = 16 \text{ kHz}$ .

El ancho de banda del canal influye de manera significativa en la calidad de la señal cuantizada.

Cuando se dispone de un ancho de banda de 16 kHz, se conserva un rango más amplio de frecuencias, lo que permite una representación más fiel y detallada de la señal original.

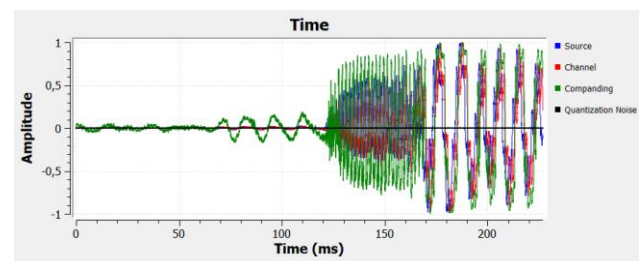


**Figura 28.** Espectro en frecuencia con  $\text{cutoff} = 2 \text{ kHz}$ .

En la segunda imagen, con un ancho de banda reducido a 2 kHz, la señal se limita a un rango de frecuencias más estrecho, lo que disminuye la cantidad de información capturada y puede provocar la pérdida de componentes de alta frecuencia. Esta restricción no solo afecta la fidelidad de la señal, sino que también puede hacer que el ruido de cuantización sea más perceptible, ya que los niveles de cuantización se distribuyen sobre un rango más limitado, aumentando así el impacto relativo del ruido en la calidad percibida.

## 4. ¿Qué impacto tiene la adición de ruido gaussiano en la señal procesada con cuantización Ley U?

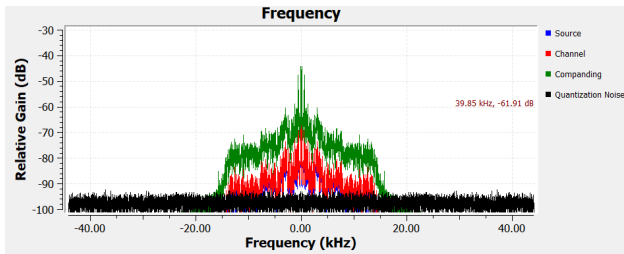
Para evaluar el impacto del ruido gaussiano, se compararon las señales procesadas sin ruido y con un nivel de ruido gaussiano de 0,2.



**Figura 29.** Señal cuantificada sin ruido.

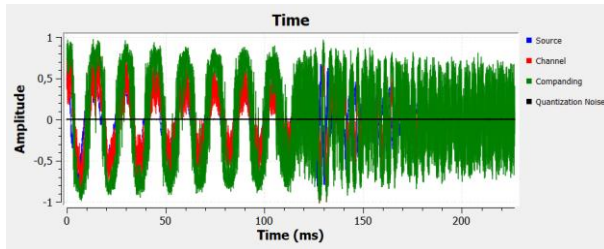
En el dominio del tiempo, la señal se presenta mucho más suave y las curvas correspondientes se encuentran más próximas entre sí, lo que indica una mayor fidelidad de la señal procesada respecto a la original. Además, las amplitudes bajas se conservan con mayor precisión.





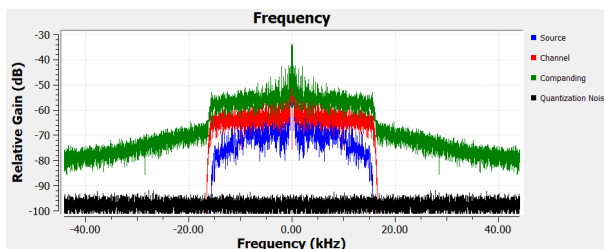
**Figura 30.** Espectro en frecuencia señal sin ruido gaussiano.

El espectro de la señal se presenta limpio, con un pico claramente definido alrededor de 0 kHz y sin el nivel de ruido de fondo previamente observado. Además, las señales compandida y la del canal están mejor alineadas con la señal original, lo que indica una mayor preservación de la información y una menor distorsión durante el proceso de transmisión.



**Figura 31.** Señal cuantificada con ruido gaussiano.

En el dominio del tiempo, la señal presenta una mayor distorsión y fluctuaciones, especialmente en las amplitudes bajas. Las curvas correspondientes a la señal original, la del canal y la compandida aparecen más separadas entre sí, lo que evidencia que el ruido gaussiano introduce discrepancias significativas en la señal procesada.



**Figura 32.** Espectro en frecuencia señal con ruido gaussiano.

La gráfica muestra las componentes de frecuencia de la señal original, la del canal, la compandida (verde) y el ruido de cuantización. La presencia de ruido gaussiano con un nivel de 0.2 eleva el nivel de fondo del espectro, especialmente en las frecuencias bajas y medias, lo que da como resultado un espectro más ruidoso y reduce la claridad de la señal.

La adición de ruido gaussiano con una intensidad de 0.2 tiene un impacto negativo considerable en la señal

procesada mediante cuantización Ley U. Este ruido incrementa el nivel de fondo en el espectro, introduce mayor distorsión en el dominio del tiempo y reduce la capacidad del cuantizador para preservar la información en las regiones de baja amplitud, que son precisamente donde esta técnica resulta más eficaz. En ausencia de ruido gaussiano, la cuantización Ley U demuestra un desempeño mucho más eficiente, aprovechando su compresión logarítmica para representar con mayor fidelidad señales con un amplio rango de amplitudes.

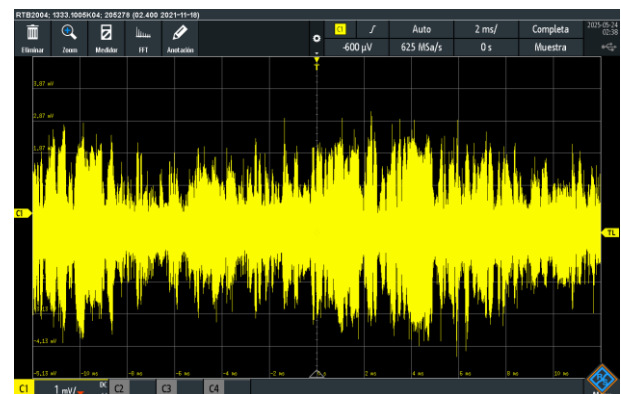
### 5. ¿Cómo se puede optimizar la cuantización Ley U para mejorar la relación señal-ruido en sistemas de procesamiento digital?

Para optimizar el proceso de cuantización, es fundamental seleccionar un valor de  $\mu$  adecuado según las características de la señal. Valores altos de  $\mu$  pueden reducir de manera significativa el ruido de cuantización en las regiones de baja amplitud, lo cual es deseable en muchas aplicaciones.

Sin embargo, un  $\mu$  excesivamente alto puede comprimir en exceso las amplitudes grandes, lo que puede introducir distorsión en señales con un amplio rango dinámico. Por ello, es importante encontrar un equilibrio que minimice el ruido sin comprometer la fidelidad de la señal.

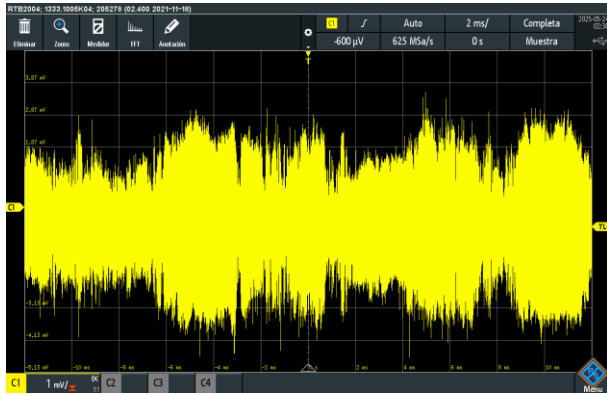
Además, es importante elegir un número suficientemente alto de bits para la cuantización. Un mayor número de bits incrementa la cantidad de niveles disponibles, mejora la resolución y reduce el error de cuantización, lo que contribuye a una representación más precisa y fiel de la señal original.

### 6. Observe uno de los casos en el osciloscopio y documente lo observado (amplitudes, delta de amplitudes, delta de tiempos)



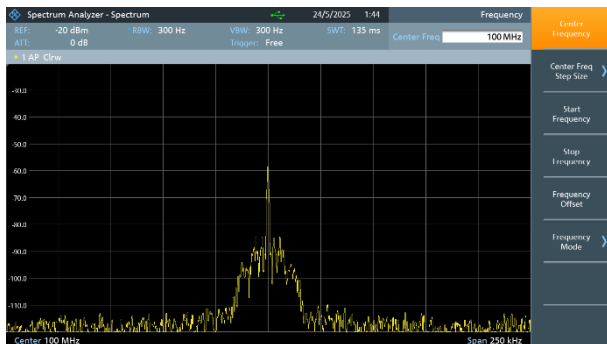
**Figura 33.** Señal cuantificada sin ruido.

En este caso, se aplicó ruido gaussiano a la señal con el objetivo de analizar su comportamiento en el dominio temporal. Como resultado, se observó que la señal original se vuelve más errática e inestable en el tiempo, debido a la interferencia introducida por el ruido.



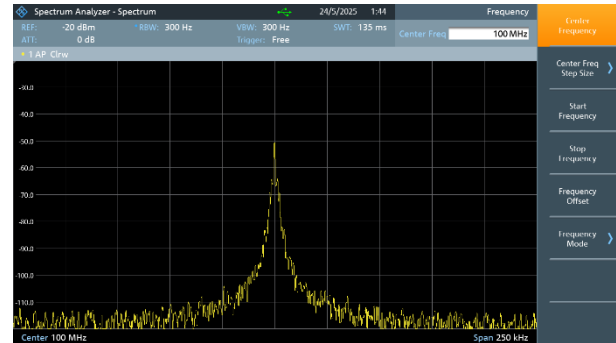
**Figura 34.** Señal cuantificada con ruido gaussiano.

**7. Observe uno de los casos en el analizador de espectro y documente lo observado (ancho de banda, delta de frecuencia y potencia)**



**Figura 35.** Señal cuantificada con cutoff = 16 kHz.

En este último caso, se modificó el parámetro cutoff para observar el comportamiento de la señal cuantificada, realizando la medición mediante un analizador de espectros. Se puede observar que, con un ancho de banda elevado, es posible conservar una mayor cantidad de información de la señal original, lo que permite concentrar mejor la potencia en el pico central del espectro. Sin embargo, este aumento de ancho de banda también puede introducir efectos secundarios que deben considerarse, dependiendo del contexto de aplicación.



**Figura 36.** Señal cuantificada con cutoff = 2 kHz.

En cuanto al ruido de cuantización, un mayor ancho de banda puede amplificarlo al permitir la captura de más componentes del ruido gaussiano, mientras que un ancho de banda menor lo atenúa, aunque a costa de perder parte de la información de la señal. En el caso del cuantizador Ley U, es fundamental seleccionar un ancho de banda adecuado y ajustarlo en conjunto con la constante  $\mu$ , de modo que se logre un equilibrio óptimo entre compresión y reducción del ruido.