

UNIVERSIDAD DIEGO PORTALES



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

Laboratorio 4 de Señales y Sistemas

Modulación Analógica

Profesor: Raydel Ortiguera

Integrantes del grupo:

- Nhayara Ramos
- Matías Vásquez
- Nicolás Cerda

Facultad de Ingeniería y Ciencias
Escuela de Ingeniería en Informática y Telecomunicaciones
Semestre 1 - 2025

Índice

1. Actividades	3
1.1. Modulador AM con modulación de producto	3
1.2. Demodulador AM con detector de envolvente	7
1.3. Modulador FM con WBFM Transmit	11
1.4. Demodulador FM con WBFM Receive	13
2. Dificultades encontradas	15
3. Conclusiones	15
4. Bibliografía	16

Resumen

En este informe se detallan las actividades realizadas en el marco del Laboratorio 4 de Señales y Sistemas. Se desarrollaron diversos moduladores y demoduladores utilizando GNU Radio, abarcando tanto modulación AM como FM. Se analizan los resultados obtenidos y se comparan las señales moduladas y demoduladas con la señal de entrada. El objetivo principal fue comprender el proceso de modulación y demodulación en señales analógicas y sus implicancias en el dominio del tiempo y la frecuencia.

Introducción

La modulación es una técnica fundamental en las telecomunicaciones que permite agregar información a una señal portadora. Esta portadora es una señal con amplitud y frecuencia constantes, diseñada para operar dentro de una banda de frecuencia específica, cumpliendo con las regulaciones internacionales.

Existen dos grandes tipos de modulación: analógica y digital. La presente experiencia se enfoca en las modulaciones analógicas más comunes, específicamente la modulación por amplitud (AM) y la modulación por frecuencia (FM).

En la modulación AM, la información se incorpora variando la amplitud de la portadora, como ocurre en la banda de AM que se extiende aproximadamente de 540 a 1600 kHz, con un ancho de banda de 8 kHz por canal. Por otro lado, la modulación FM consiste en modificar la frecuencia de la portadora, utilizada en la banda de FM que abarca entre 88 y 108 MHz. Existen además otras modulaciones, como la modulación por fase (PM), que modifica la fase de la portadora.

Cabe destacar que la información no se transmite directamente en la banda de origen, sino que se desplaza a una banda asignada por organismos reguladores internacionales, como la banda AM, FM o WiFi (2.4 GHz).

Este informe aborda el diseño, implementación y análisis de sistemas de modulación analógica utilizando la plataforma GNU Radio, a través de cuatro actividades principales:

- Construcción de un modulador AM mediante modulación por producto.
- Implementación de un demodulador AM con detector de envolvente y filtro pasa bajos.
- Construcción de un modulador FM utilizando el bloque **WBFM Transmit**.
- Implementación de un demodulador FM con el bloque **WBFM Receive**.

Cada actividad incluye la descripción del diseño del sistema, la ejecución con señales reales, análisis gráfico y numérico de los resultados, y la comparación con la señal original para validar su correcto funcionamiento.

1. Actividades

1.1. Modulador AM con modulación de producto

1.1.1. a) Descripción de los algoritmos desarrollados

Se diseñó un sistema de modulación AM (Amplitud Modulada) en GNU Radio, utilizando el método de modulación por producto, donde la señal de información modula directamente la amplitud de una portadora. La implementación se realizó tomando como entrada un archivo de audio `.wav` (por ejemplo, `acustis.wav`) que actúa como la señal de banda base o moduladora.

Fundamento teórico La modulación AM puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$g(t) = A_c[1 + m(t)] \cos(\omega_c t)$$

donde:

- $g(t)$: señal modulada en amplitud (AM),
- A_c : amplitud de la portadora,
- $m(t)$: señal modulante (audio),
- ω_c : frecuencia angular de la portadora.

Este tipo de modulación produce una señal cuya envolvente replica la forma de la señal $m(t)$, lo que permite su fácil demodulación.

Implementación en GNU Radio Se desarrolló el flujo utilizando los siguientes bloques principales:

- **Wav File Source**: bloque que carga y reproduce el archivo `.wav`, el cual contiene la señal de banda base $m(t)$.
- **Add Const (1.0)**: se suma 1 a la señal para obtener $[1 + m(t)]$, parte clave de la expresión estándar de modulación AM.
- **Signal Source (coseno)**: se genera la portadora senoidal $\cos(\omega_c t)$. Se elige una frecuencia de **2000 Hz**. Esta frecuencia corresponde a una portadora de onda larga, reduciendo la carga computacional. Además, se utiliza una **amplitud de 2** para la portadora, A_c : 2 de modo que la señal modulada resultante tenga una amplitud adecuada para su análisis y visualización.
- **Multiplicador**: se multiplica la señal $[1 + m(t)]$ por la portadora $\cos(\omega_c t)$, implementando así la ecuación $g(t) = A_c[1 + m(t)] \cos(\omega_c t)$.

- **QT GUI Time Sink (Osciloscopio):** permite observar la señal resultante en el dominio del tiempo. Se puede apreciar la envolvente correspondiente a $m(t)$, confirmando la correcta implementación de la modulación AM.
- **QT GUI Frequency Sink (Analizador de espectros):** permite observar el espectro de la señal modulada. En una modulación AM clásica, deben aparecer dos picos prominentes en las frecuencias $\pm f_c$, que corresponden a la portadora. A ambos lados de estos picos se encuentran las bandas laterales, que son copias del espectro de la señal de mensaje $m(t)$ desplazadas en frecuencia. El ancho de banda total de la señal modulada es el doble del ancho de banda de la señal original.

$$S(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + M(f - f_c) + \delta(f + f_c) + M(f + f_c)]$$

1.1.2. b) Resultados (numéricos y gráficos)

Se obtuvo una señal AM cuya envolvente replica la señal de entrada, lo cual valida el correcto funcionamiento del sistema de modulación. Se utilizaron bloques de osciloscopio (QT GUI Time Sink) y analizador de espectros (QT GUI Frequency Sink) para visualizar la señal tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

A continuación, se presentan las figuras que ilustran el funcionamiento del sistema:

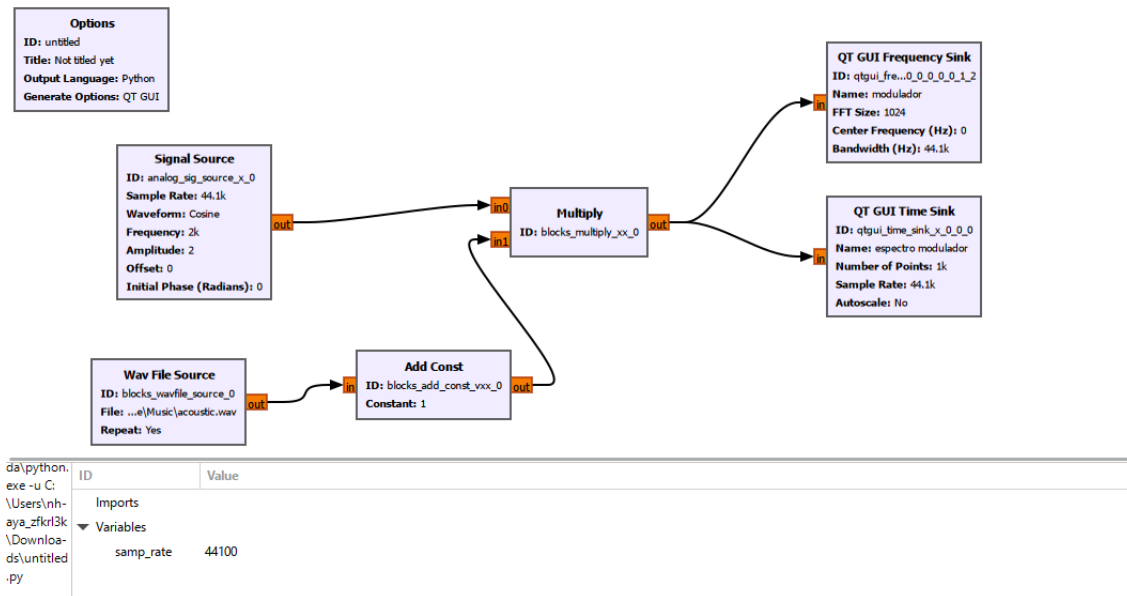
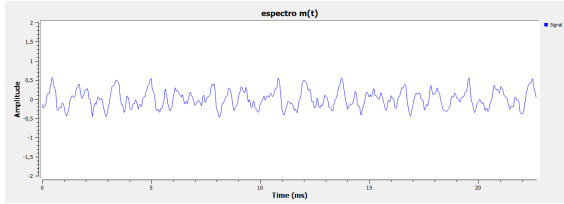
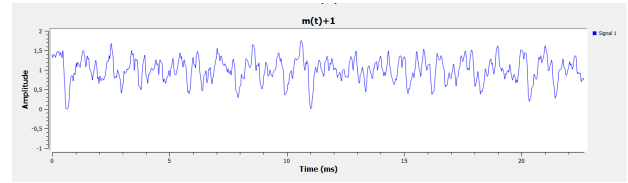


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema de modulación AM en GNU Radio.

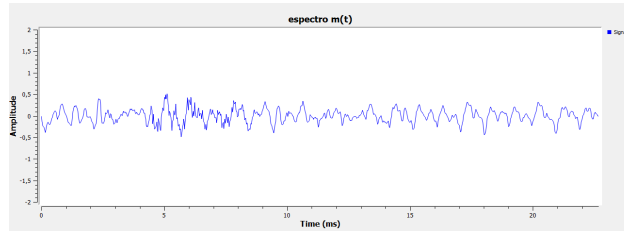
A continuación se usaron bloques de osciloscopio (QT GUI Time Sink) y analizador de espectros (QT GUI Frequency Sink) a la salida de los bloques de interés para hacer un buen análisis.



(a) Señal de entrada $m(t)$

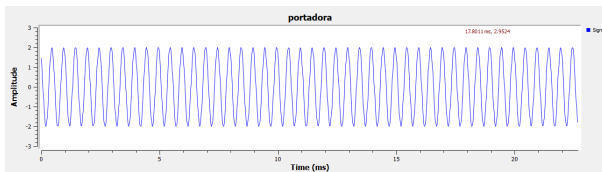


(b) Señal de entrada $m(t) + 1$

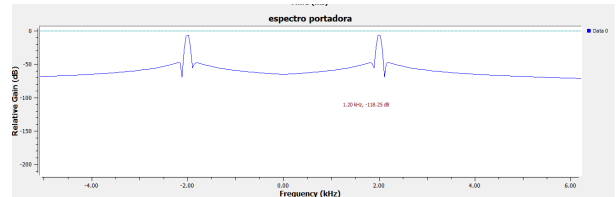


(c) Espectro señal entrada $m(t)$

Figura 2: Representación gráfica señal de entrada



(a) portadora con $A_c = 2$



(b) Espectro de la portadora , se logran ver 2 picos de 2khz , debido a la frecuencia de la portadora

Figura 3: Representación Portadora

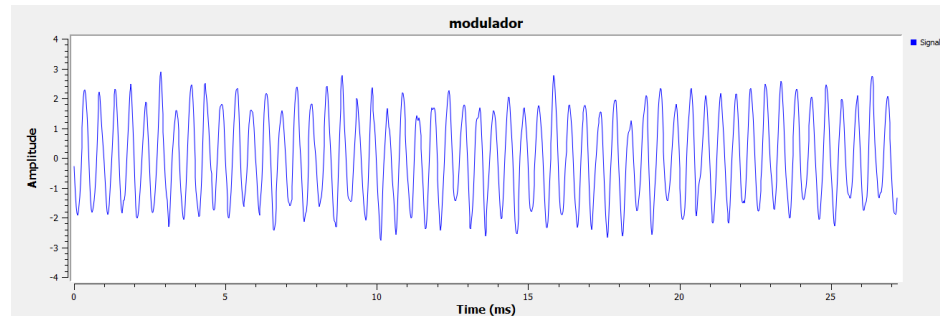


Figura 4: Diagrama del modulador AM implementado en GNU Radio. En la gráfica se visualizan tanto la señal original (modulante) como la portadora. La amplitud de la portadora varía en el tiempo siguiendo la forma de la señal de entrada $m(t)$, lo que genera la modulación en amplitud. La envolvente de la portadora replica la forma de la señal modulante, representando visualmente la información transmitida.

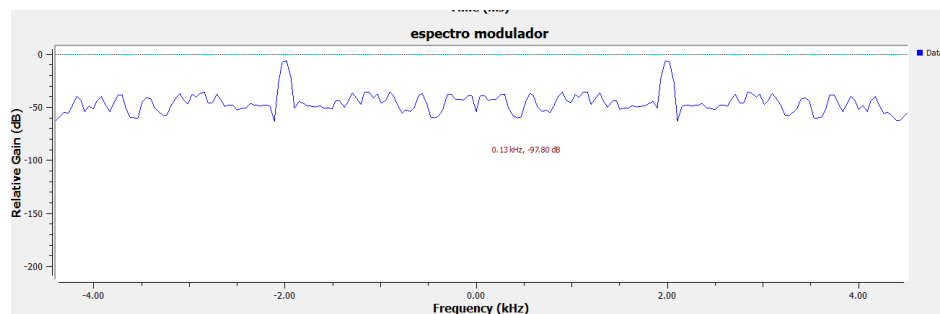


Figura 5: Espectro de la señal modulada AM. La portadora, con una frecuencia 2000 Hz configurada en GNU Radio, aparece como dos picos simétricos ubicados a aproximadamente ± 2 kHz en el dominio de frecuencia. Como la gráfica está centrada en 0 Hz (frecuencia baseband), las bandas laterales, que contienen el contenido espectral de la señal $m(t)$, se distribuyen a ambos lados de estos picos.

1.1.3. c) Análisis de resultados

La Figura 5 muestra el espectro de la señal modulada en amplitud. Se verificó que el espectro de la señal modulada presenta las bandas laterales características de la modulación AM, centradas alrededor de la frecuencia portadora. En el dominio del tiempo, se observó que la señal resultante mantiene la envolvente de la señal de entrada, lo cual confirma que la modulación se realizó correctamente. La portadora fue modulada en amplitud por la señal de audio proveniente del archivo .wav, y dicha envolvente replica fielmente la forma de onda original $m(t)$.

En el dominio de la frecuencia, se identifican picos en ± 2 kHz, correspondientes a la frecuencia portadora configurada, junto con las bandas laterales que se extienden alrededor de estos picos. Esto se ajusta a la expresión teórica del espectro de una señal AM:

$$S(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + M(f - f_c) + \delta(f + f_c) + M(f + f_c)]$$

donde $\delta(f \pm f_c)$ representa los componentes espectrales de la portadora y $M(f \pm f_c)$ las copias desplazadas del espectro de $m(t)$. Esta configuración confirma que se trata de una modulación AM con portadora visible y bandas laterales completas.

1.2. Demodulador AM con detector de envolvente

1.2.1. a) Descripción de los algoritmos desarrollados

Para recuperar la señal original $m(t)$ desde la señal modulada en amplitud $g(t) = A_c[1 + m(t)] \cos(\omega_c t)$, se implementó un demodulador de envolvente utilizando bloques simples en GNU Radio.

El circuito funciona de la siguiente forma:

- **Virtual Sink / Source:** permiten conectar el sistema modulador con el demodulador internamente, sin usar archivos intermedios.
- **Abs (1):** al tomar el valor absoluto de la señal AM, se obtiene su envolvente, que contiene la información original $m(t)$, más una componente de alta frecuencia. El bloque Abs convierte la señal modulada en una forma positiva que sigue la envolvente (el audio). Pero en esa salida, la portadora sigue existiendo (aunque alterada), junto con armónicos nuevos
- **Low Pass Filter:** este filtro pasa bajos elimina las frecuencias altas, dejando solo la parte útil de la señal. Se usó una frecuencia de corte de 2200 Hz, suficiente para conservar el audio.
- **Audio Sink:** finalmente, la señal recuperada se envía al bloque de audio para reproducirla y verificar que se demoduló correctamente.

1.2.2. b) Resultados (numéricos y gráficos)

La señal demodulada recuperada mostró similitud con la original.

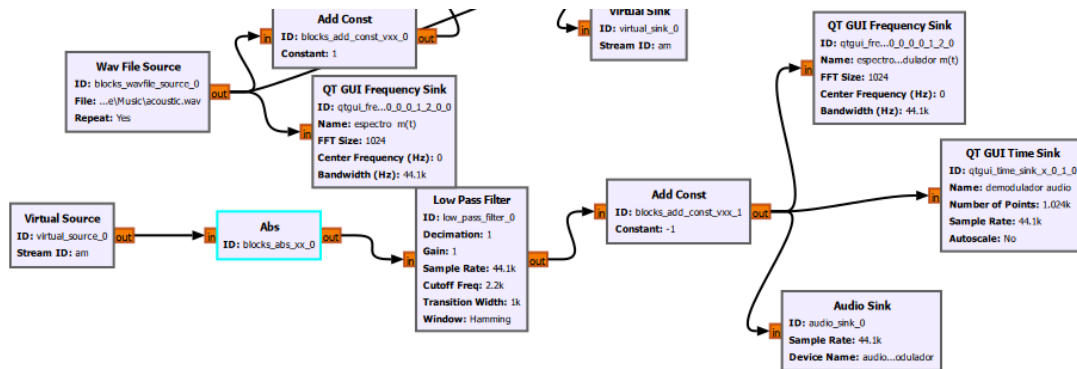
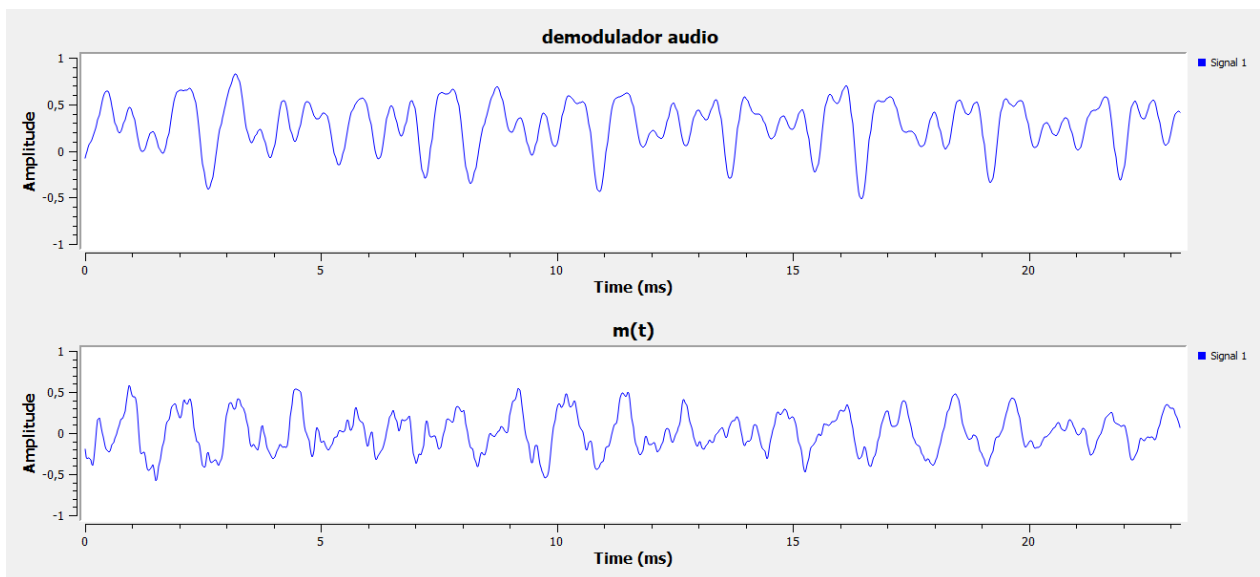


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de modulación AM en GNU Radio.



(a) comparación demodulación de señal obteniendo $m(t)$ y señal $m(t)$

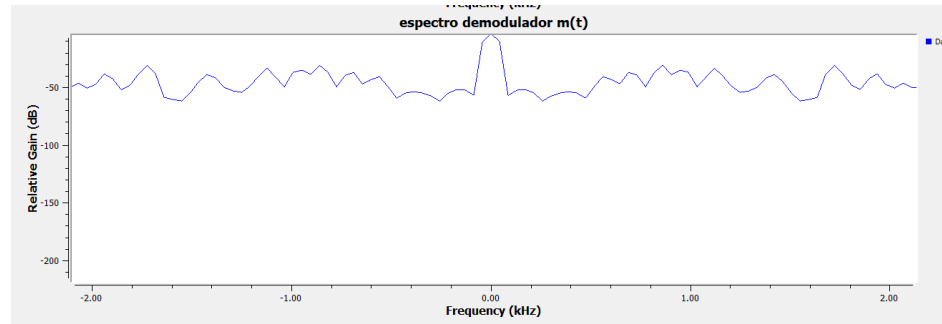


Figura 8: Espectro de la señal demodulada AM. Se observa un pico centrado en 0 Hz, característico del detector de envolvente, el cual introduce una componente continua tras la rectificación. Las frecuencias de la señal original (audio) están presentes hasta aproximadamente 2 kHz, aunque con cierta pérdida de nitidez debido a la naturaleza no lineal del proceso de detección. La portadora, originalmente ubicada en 2000 Hz, ha sido eficazmente atenuada por el filtro pasa bajos con frecuencia de corte en 2200 Hz, lo que confirma una correcta supresión de dicha componente. La forma espectral resultante muestra simetría y contenido en el rango esperado, validando el funcionamiento adecuado del demodulador.

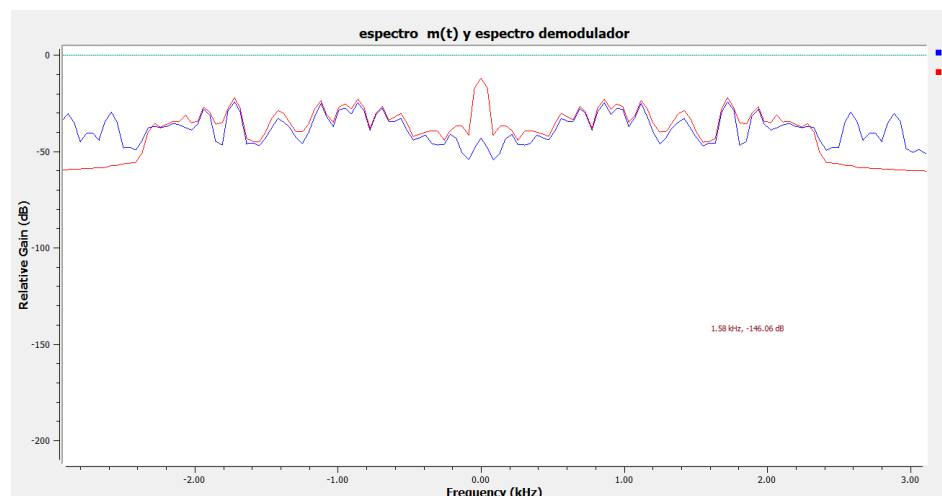


Figura 9: Comparación entre la señal original $m(t)$ y la señal demodulada. Aunque ambas presentan una forma similar, se observa que la demodulada presenta ciertas diferencias, especialmente en la nitidez y amplitud de las variaciones. Esto sugiere que aún es posible mejorar la respuesta del filtro pasa bajos para lograr una mayor fidelidad en la recuperación de la señal.

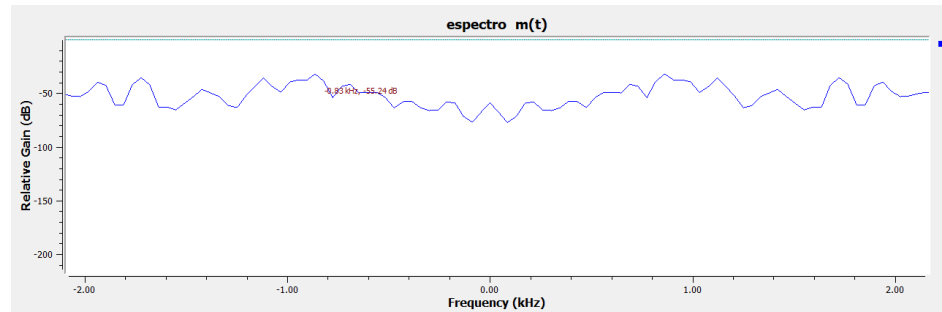


Figura 10: Se logra ver el espectro de la sela $m(t)$ orinal y podemos ver cierto parecido .

1.2.3. c) Análisis de resultados

El espectro de la señal demodulada muestra un pico en 0 Hz, producto del componente continua introducido por el detector de envolvente tras la rectificación. Se observan también las frecuencias de la señal original $m(t)$ distribuidas hasta aproximadamente 2 kHz, lo cual coincide con el contenido del archivo `acoustic.wav`. No se evidencian restos significativos de la portadora en 2000 Hz, lo que confirma que el filtro pasa bajos (cutoff en 2200 Hz, ancho de transición de 1000 Hz) cumplió correctamente su función de atenuar esa componente.

El bloque `Add Const` con valor $-2,0$ se utilizó para eliminar el offset DC, dejando solo la parte útil de la envolvente ($2m(t)$). Posteriormente, la señal fue escalada con un bloque `Multiply Const` con ganancia 0.5, lo que explica la reducción en la amplitud observada en el espectro (alrededor de $-33,07$ dB).

En el dominio del tiempo, la señal demodulada presenta una envolvente clara y oscilaciones que corresponden al contenido de audio. Al reproducir la señal con el bloque `Audio Sink`, se comprobó que el sonido resultante se asemeja al archivo original. No obstante, se percibe un leve ruido de fondo, atribuible a la distorsión generada por el proceso de rectificación (no lineal) y a imperfecciones en el filtrado. Aun así, el resultado general es satisfactorio y confirma el funcionamiento correcto del demodulador AM implementado.

1.3. Modulador FM con WBFM Transmit

1.3.1. a) Descripción de los algoritmos desarrollados

Para el modulador de señal FM se configuraron los siguientes bloques:

- **Wav File Source:** carga el archivo de audio .wav que será la señal a modular. El archivo tiene una frecuencia de muestreo de 11025 Hz, por eso todos los bloques deben usar esa misma tasa para evitar errores.
- **WBFM Transmit:** hace la modulación FM, que cambia la frecuencia de una portadora según la amplitud de la señal de audio. La salida es una señal compleja. Para evitar distorsiones, el bloque usa una frecuencia de muestreo mayor (44100 Hz), que es 4 veces la del audio.
- **Complex to Float:** convierte la señal compleja que sale del modulador en señales reales para poder mostrarla en gráficos de tiempo y frecuencia, que solo aceptan señales reales.
- **QT GUI Time Sink:** muestra cómo cambia la señal en el tiempo, ayudando a entender la forma de la señal modulada.
- **QT GUI Frequency Sink:** muestra el espectro de frecuencias de la señal modulada, para verificar que la modulación FM se realizó correctamente y ver el ancho de banda ocupado.

1.3.2. b) Resultados (numéricos y gráficos)

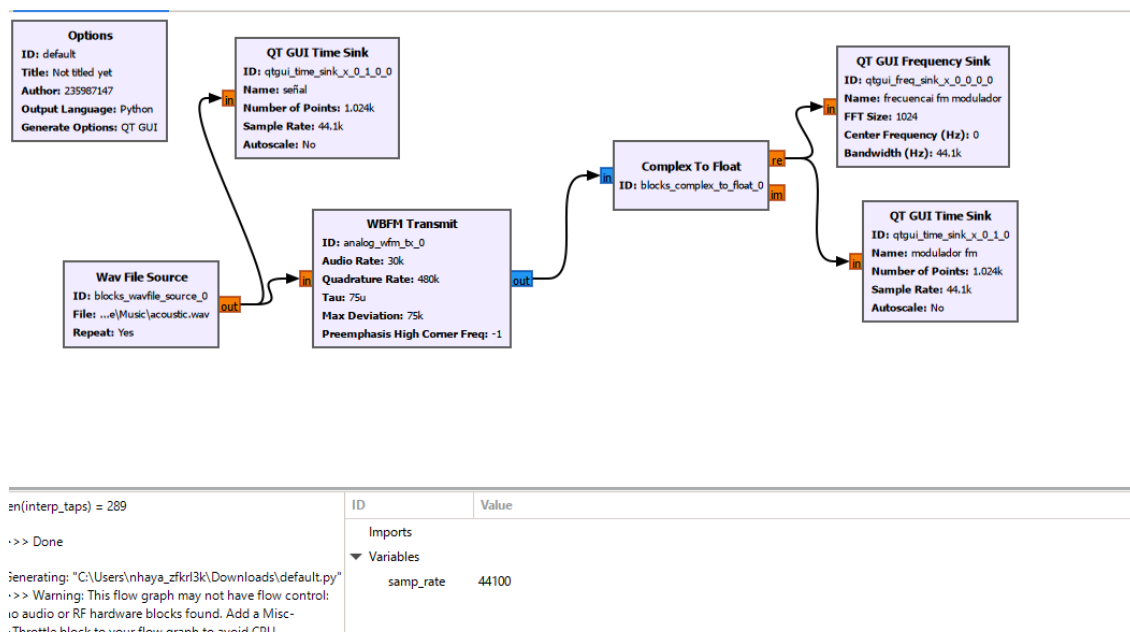


Figura 11: Diagrama de bloques del sistema de modulación FM en GNU Radio.

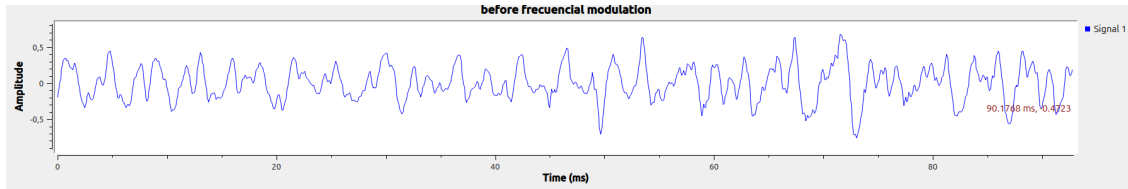


Figura 12: Señal obtenida del archivo .wav

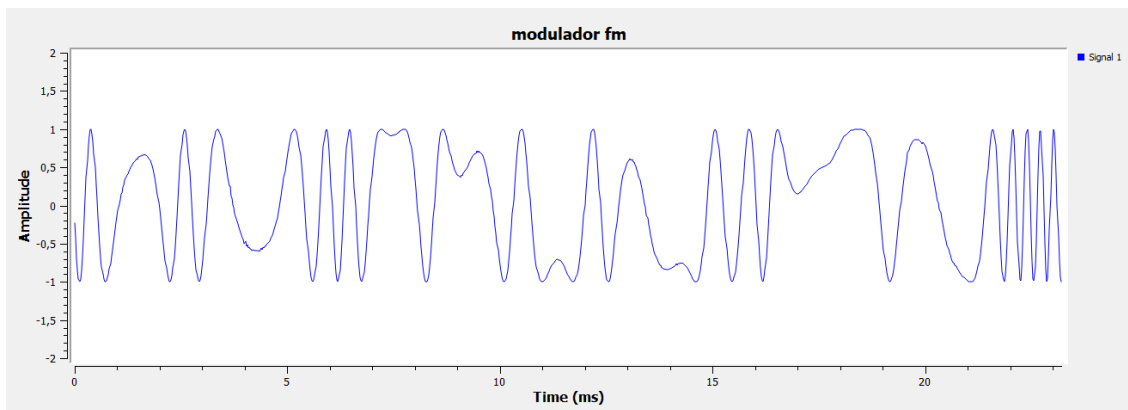


Figura 13: Señal obtenida luego de la modulación

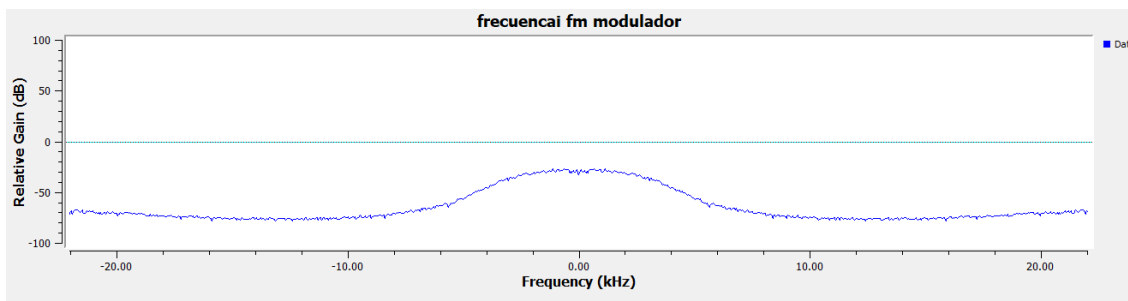


Figura 14: Espectro de frecuencia de la señal modulada. Se observa un pico principal centrado en 0 Hz, correspondiente a la portadora en banda base. Alrededor del pico, el espectro muestra una caída gradual en un rango cercano a ± 5 kHz, que representa las componentes más fuertes de la señal modulante. La simetría del espectro indica que la modulación FM se realizó correctamente, y las líneas rectas en las frecuencias extremas reflejan el límite del ancho de banda impuesto por el muestreo y los filtros del sistema. Por lo tanto, el espectro mostrado es coherente con los parámetros usados: audio rate de 30 kHz y desviación máxima de 75 kHz.

1.3.3. Análisis de resultados

La señal modulada FM es compleja, con parte real e imaginaria. La amplitud se mantiene constante entre 1 y -1, ya que en FM la información se codifica en la variación de la frecuencia

(fase) y no en la amplitud.

Teóricamente, la señal modulada se expresa como

$$g(t) = A_c e^{j\theta(t)},$$

donde A_c es constante y $\theta(t)$ depende linealmente de la señal modulante. Esto implica que la envolvente $R(t) = |g(t)| = A_c$ es constante.

El espectro de frecuencia muestra un pico centrado en 0 Hz (banda base) y picos simétricos cerca de la mitad de la frecuencia de muestreo, debido a la representación digital y la naturaleza de la señal. La simetría confirma que la modulación FM fue correctamente realizada.

En conclusión, el análisis temporal y espectral coincide con la teoría de la modulación FM, donde la señal mantiene amplitud constante y varía en frecuencia para transmitir la información.

1.4. Demodulador FM con WBFM Receive

1.4.1. a) Descripción de los algoritmos desarrollados

Para el demodulador FM se usaron los siguientes bloques:

- **WBFM Receive:** realiza la demodulación de la señal FM recibida. Usa una tasa de muestreo de 44100 Hz, igual que el modulador, para mantener la coherencia. El parámetro *audio decimation* está en 4, lo que significa que reduce la tasa de muestreo de audio para facilitar el procesamiento y evitar sobrecarga, dividiendo la frecuencia de muestreo interna por 4.
- **QT GUI Time Sink (Osciloscopio):** muestra la señal demodulada en el dominio del tiempo, permitiendo observar cómo varía la señal de audio tras la demodulación.
- **QT GUI Frequency Sink (Analizador de espectros):** permite visualizar el espectro de la señal demodulada, ayudando a verificar que la información de audio ha sido recuperada correctamente.
- **Audio Sink:** reproduce la señal demodulada para que se pueda escuchar el audio resultante del proceso completo.
- **Virtual Source:** conecta internamente la salida del modulador con la entrada del demodulador, evitando la necesidad de usar archivos o hardware externo para transmitir la señal.

1.4.2. b) Resultados (numéricos y gráficos)

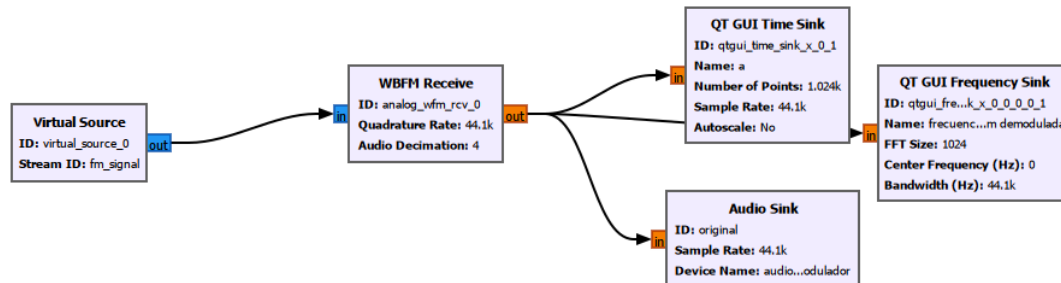


Figura 15: Diagrama de bloques del sistema de demodulación FM en GNU Radio.

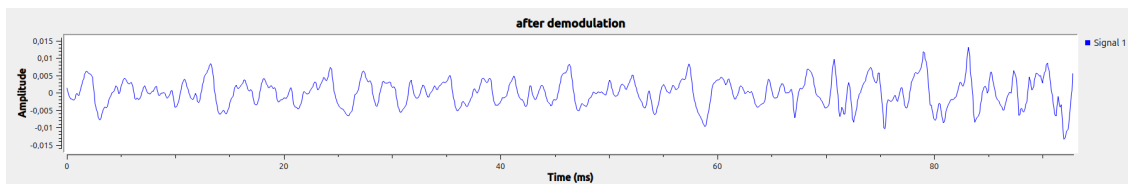


Figura 16: Señal obtenida luego de la demodulación

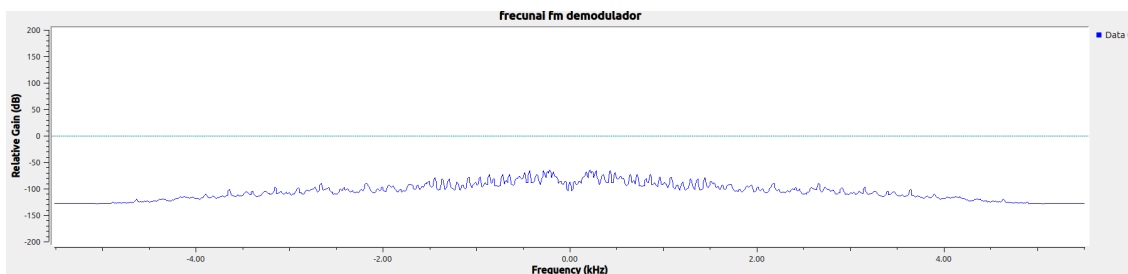


Figura 17: Espectro de frecuencia de la señal demodulada

1.4.3. c) Análisis de resultados

Se puede observar que la señal demodulada es similar a la señal anterior a la modulación, además de que en la señal se puede escuchar claramente el sonido del archivo ".wav"; se puede observar en el espectro de frecuencia que la señal pierde los picos de frecuencia debido a que pierde la señal portadora para volverse muy similar a la señal original.

2. Dificultades encontradas

Durante la realización de las actividades surgieron varias dificultades que requirieron tiempo y análisis para poder resolverlas. Uno de los principales desafíos fue configurar correctamente los bloques en GNU Radio, especialmente al definir los parámetros del filtro pasa bajos y lograr que el modulador y el demodulador funcionaran de forma sincronizada.

También fue complicado interpretar los espectros obtenidos. En particular, al trabajar con modulación AM, fue difícil al principio identificar si la portadora seguía presente después de aplicar el detector de envolvente. Esto se debía a que no bastaba con ver el gráfico: era necesario comprender bien la teoría de la modulación para saber qué buscar y cómo interpretarlo. Al principio nos costó, pero con la explicación del laboratorio fuimos entendiendo mejor.

Otro punto complejo fue lograr que el audio demodulado se escuchara lo más parecido posible al original. Ajustar correctamente el filtro pasa bajos fue clave para mejorar la calidad, aunque aun así se percibía un leve ruido de fondo. Entendimos que esto es normal en modulación AM, ya que es una técnica muy sensible al ruido, por lo que se utiliza más en contextos donde hay menos interferencias.

Finalmente, también notamos que al trabajar con frecuencias más altas, el computador requería más recursos, lo que hacía que algunas simulaciones fueran lentas o se trabaran.

A pesar de todo, estas dificultades fueron valiosas porque nos ayudaron a comprender mejor tanto el funcionamiento práctico como los conceptos teóricos de la modulación y demodulación AM.

3. Conclusiones

Las actividades realizadas permitieron reforzar los conocimientos teóricos sobre modulación analógica, particularmente en relación con la modulación en amplitud (AM) y frecuencia modulada (FM), y su implementación práctica en GNU Radio. A través de los ejercicios, fue posible visualizar conceptos fundamentales como la portadora, las bandas laterales, el ancho de banda requerido y los efectos del ruido sobre las señales moduladas.

La implementación de sistemas AM permitió entender cómo una señal de audio puede transmitirse mediante la variación de la amplitud de una portadora, y cómo el detector de envolvente, junto con un filtro pasa bajos bien ajustado, permite recuperar la señal original. Sin embargo, también se evidenciaron las limitaciones propias de esta técnica: la sensibilidad al ruido, la distorsión provocada por el proceso de rectificación, y la necesidad de una adecuada configuración del filtro para evitar pérdida de información o exceso de componentes no deseadas.

Por otro lado, la modulación FM demostró una mayor robustez frente al ruido y una calidad de audio superior, incluso en presencia de interferencias. Esta técnica, aunque más compleja de implementar, mantiene mejor la fidelidad del mensaje original gracias a que codifica la información en la frecuencia de la portadora, en lugar de su amplitud.

GNU Radio se destacó como una herramienta versátil y poderosa para diseñar, simular

y analizar sistemas de comunicaciones. Gracias a su entorno visual y bloques modulares, fue posible observar en tiempo real el comportamiento de las señales, ajustar parámetros y evaluar el impacto de distintas configuraciones.

En resumen, esta experiencia no solo permitió afianzar los conceptos teóricos sobre modulación analógica, sino también adquirir habilidades prácticas para interpretar espectros, mejorar la calidad de señales, y comprender de manera crítica las ventajas y desventajas de las técnicas AM y FM en distintos contextos.

4. Bibliografía

- GNU Radio Documentation: <https://wiki.gnuradio.org/>
- Haykin, S. *Communication Systems*. Wiley, 5th Edition.
- Slides y guía de laboratorio proporcionadas por el docente.