

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INFORMÁTICA



Laboratorio N°2

Integrantes: Christian Méndez

Israel Arias

Curso: Redes de computadores

Profesor: Carlos González

Ayudante: Miguel Salinas

15 de Junio de 2022

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
2. Marco Teórico	2
3. Desarrollo de la experiencia	4
3.1. Consideraciones a tener en cuenta	4
3.1.1. Gráfico de la señal de audio en el tiempo	4
3.1.2. Cálculo de la transformada de Fourier de las señales de audio	4
3.1.3. Gráfico de la señal en el dominio de la frecuencia	5
3.2. Lectura de señal de audio	5
3.3. Aplicación de remuestreo	5
3.4. Creación de la señal portadora	6
3.5. Aplicación de la modulación en amplitud (AM)	6
3.6. Demodulación	8
3.6.1. Creación de filtro pasabajos	8
4. Análisis de resultados	10
4.1. Comprobación de resultados obtenidos	10
4.2. ¿Qué ocurre con el espectro de frecuencias de la señal original luego de modularla?	10
4.3. Ancho de banda usado por la señal modulada en AM	10
4.4. ¿Es posible recuperar la señal original independiente del índice de modulación utilizado?	11
4.5. ¿Cuál es el costo, en términos de ancho de banda, de modular una señal?	11
4.6. ¿Qué problemas pueden ocurrir al demodular una señal?	12
4.7. ¿Qué sucede con la señal modulada AM al utilizar un índice de modulación mayor a 1?	13
5. Conclusión	13
Bibliografía	14

1. Introducción

En la actualidad las redes de computadores son vitales en la actividad humana, la transmisión de información que es posible a través de ellas se ha vuelto indispensable “Desde los precarios sistemas de transmisión en base a señales de humo, palomas mensajeras, o mensajeros que recorrían a caballo largas distancias, hasta llegar a las tecnologías de última generación como los teléfonos celulares, o una comunicación satelital. En la actualidad, la transmisión de datos utilizando señales eléctricas ha reemplazado, casi a la totalidad de cualquier otro tipo de transmisión de información, dado que es más fácil controlarla, amplificarla y digitalizarla, para su posterior manipulación.” (Gobierno de la provincia de Buenos Aires, 2009) Es debido a esta importancia que, con el fin de seguir aprendiendo respecto al procesamiento de señales en el presente informe, se detalla la experiencia N°2 de laboratorio de la asignatura Redes de Computadores, en la cual el principal objetivo consiste en profundizar los conceptos de modulación por amplitud para la transmisión de señales por un canal de comunicación y la importancia de esta técnica en el ámbito de las telecomunicaciones. Usando como herramientas principales el lenguaje de programación Python 3 y la transformada de Fourier se estudiará una señal de audio grabada, la cual será analizada a través de sus correspondientes gráficos de tiempo y frecuencia. Adicionalmente se aplicará una modulación por amplitud, este procedimiento consiste en desplazar un mensaje (señal de audio) por medio de una onda portadora, para luego filtrar el mensaje modulado así recuperar la señal de audio original. Se busca entender todo lo que sucede al efectuar esta actividad. Como objetivo secundario, también se busca el seguir aprendiendo de como un lenguaje como Python 3 puede ser aplicado al estudio y procesamiento de señales a través de sus distintas librerías, pudiendo modificarlas, aplicar operaciones matemáticas y generar gráficos o espectrogramas facilitando el estudio y análisis de estas.

2. Marco Teórico

En esta sección se definirán distintos conceptos que se presentaran a lo largo del informe que se consideran relevantes para la comprensión del trabajo desarrollado:

- Señal: Según Fernández (2021) “son la representación eléctrica de los datos. Los diferentes medios de transmisión permiten el envío de los datos en forma de variaciones de parámetros eléctricos, como tensiones o intensidades.”
- Señal analógica: Fernández (2021) las define como “señales en que la intensidad de la señal varía suavemente en el tiempo y pueden tomar cualquier valor en el tiempo.”
- Señal digital: Fernández (2021) menciona que “es una señal en la cual la intensidad se mantiene constante durante un intervalo de tiempo, tras el cual la señal cambia a otro valor constante. Las variaciones de la señal sólo pueden tomar valores discretos.”
- Frecuencia: Es la razón en la cual una señal se repite, se mide en Hertz.
- Transformada de fourier: Como define Martínez (2021) la transformada de Fourier “es una transformación matemática usada para transformar señales entre el dominio del tiempo o espacio al dominio de la frecuencia, y viceversa. Es la herramienta matemática que permite poder analizar y trabajar con señales.”
- Amplitud: medida que expresa la distancia entre un punto y el eje horizontal en un cierto momento.
- Señal moduladora: Mensaje que se desea transportar por medio de una señal portadora.
- Señal portadora: Señal sinusoidal usada para transportar un mensaje.
- Señal modulada: Señal resultante al multiplicar la señal moduladora por la señal portadora.
- Modulación: Cambiar un aspecto de la señal portadora con respecto a una señal moduladora.

- Modulación AM: Pérez (2009) se refiere a la modulación AM como: “Variación de los parámetros (amplitud, frecuencia o fase) de una señal designada como portadora, de acuerdo a las variaciones de una señal de información o moduladora.”
- Demodulación: Proceso en el cual se recupera la señal que contiene el mensaje de una señal modulada.
- Filtro: “Es una operación matemática que toma una secuencia de números (la señal de entrada) y la modifica produciendo otra secuencia de números (la señal de salida) con el objetivo de resaltar o atenuar ciertas características.” (EAM,2011)

3. Desarrollo de la experiencia

En esta sección se detallará las actividades realizadas en esta experiencia de laboratorio.

3.1. Consideraciones a tener en cuenta

Esta subsección incluye procedimientos relevantes y usados reiteradamente a lo largo del desarrollo de la experiencia, por lo que son presentados a continuación antes de proceder al detalle de las actividades realizadas.

3.1.1. Gráfico de la señal de audio en el tiempo

Para realizar el gráfico de una señal es necesario construir una lista que corresponda al eje del tiempo donde cada posición de la lista corresponde a un segundo específico de la señal, para construir esta lista la librería de Python **Numpy** ofrece la función **linspace()** donde los parámetros de entrada son el tiempo inicial (0), duración de la señal y cantidad de elementos de la lista de amplitudes de la señal. La duración de la señal ingresada en la función **linspace()** es calculada a través de la división de la cantidad de elementos en la lista de amplitudes sobre la frecuencia de muestreo de la señal. De manera más simple, el objetivo de realizar la lista de tiempo fue encontrar en que segundo ocurrió la amplitud obtenida por la lectura de la señal, así cada elemento de la lista de tiempo queda asociado a una determinada amplitud de la lista de amplitudes.

3.1.2. Cálculo de la transformada de Fourier de las señales de audio

Para el cálculo de la transformada de Fourier se utiliza la función **fft()** y para obtener el dominio de la frecuencia se utiliza la función **fftfreq()**, ambas ofrecidas por la librería SciPy. La función **fft()** recibe como parámetro la señal de audio (lista con las amplitudes) y **fftfreq()** recibe como parámetro el largo de la lista de amplitudes.

3.1.3. Gráfico de la señal en el dominio de la frecuencia

Con la transformada de Fourier calculada y su correspondiente dominio de la frecuencia es posible realizar el gráfico de la señal en su dominio de la frecuencia.

3.2. Lectura de señal de audio

Para el desarrollo de la actividad, se entregó una señal de audio llamada **handel** en formato **wav**, para realizar la lectura de esta señal se utilizó la librería ofrecida por Python **SciPy**, a través de su función **read()** disponible en el paquete de **I/O**, la cual recibe como parámetro el nombre del archivo a leer con su extensión **.wav** y retorna dos resultados, en primer lugar la frecuencia de muestreo de la señal y en segundo lugar la data del archivo leído (lista con las amplitudes de la señal). Luego de realizar la lectura se puede observar que la señal posee una **duración de 8.92 segundos** y una **frecuencia de muestreo de 8192 [Hz]**. Se presenta el gráfico en el dominio del tiempo y la frecuencia para esta señal en las figuras 1 y 2.

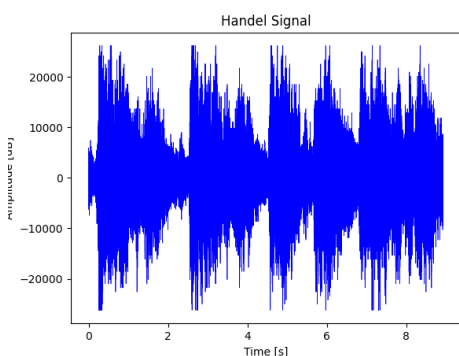


Figura 1: Gráfico de la señal de audio Handel en el dominio del tiempo

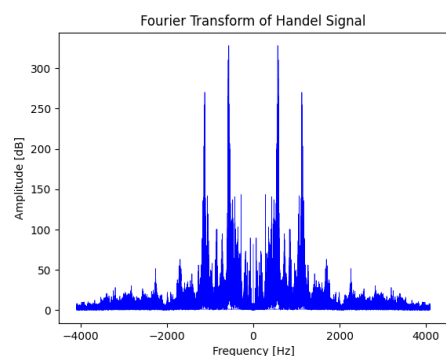


Figura 2: Transformada de Fourier para la señal de audio Handel

3.3. Aplicación de remuestreo

Como indica el teorema del muestreo, la frecuencia de muestreo debe ser el doble que la frecuencia máxima de la señal, en este caso de aplicación la frecuencia máxima estará dada por la señal portadora que se ha determinado será un coseno con una frecuencia de

20.000[Hz], por lo cual la frecuencia de muestreo debe ser de por lo menos 40.000 Hz. Dado que la señal de audio Handel (con f_s de 8192 [Hz]) no supera esta frecuencia de muestreo de 40.000 [Hz], se aplicó un remuestreo de 10 veces la frecuencia de muestreo original del audio para cumplir el teorema del muestreo.

3.4. Creación de la señal portadora

Como se mencionó anteriormente y con el fin de modular la señal de audio Handel se construyó una señal portadora con una frecuencia 20.000 [Hz] de la forma:

$$y_c(t) = \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

Donde f_c corresponde a la frecuencia de 20.000 [Hz] y t a la variable de tiempo, en la **figura 3** se observa la portadora en el dominio del tiempo, cabe destacar que se muestra una porción de la señal portadora para apreciar de una manera más clara sus características. En cuanto a la transformada de la portadora se observa en la **figura 4** que corresponde a dos impulsos, uno en 20.000 [Hz] y el otro en -20.000 [Hz].

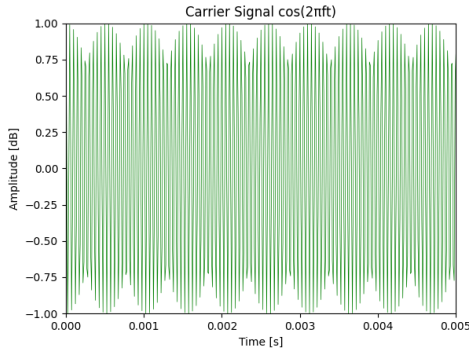


Figura 3: Gráfica de la señal portadora

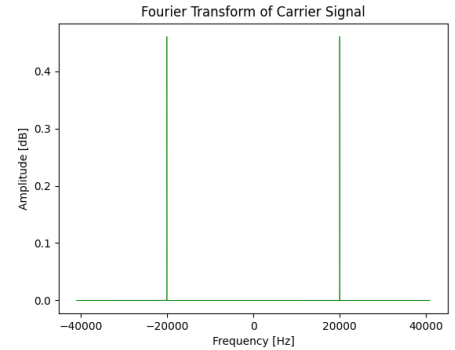


Figura 4: Transformada de Fourier para la señal portadora

3.5. Aplicación de la modulación en amplitud (AM)

La modulación consiste en el transporte de información por medio de una señal portadora, particularmente la modulación AM desplaza las frecuencias del mensaje a modular a la frecuencia de la portadora. Esta modulación recibe su nombre ya que el mensaje

”modula” la amplitud a lo largo de la señal portadora, este efecto es conseguido al multiplicar el mensaje por la señal portadora. Para aplicar la modulación AM a la señal de audio Handel, se tiene la siguiente ecuación:

$$y(t) = km(t)\cos(2\pi f_c t) \quad (2)$$

El coseno corresponde a la señal portadora con frecuencia de 20.000 [Hz], $m(t)$ a la señal de audio y k al índice de modulación, se solicita aplicar la modulación para un $k=1$ y $k=1.25$.

Al aplicar la ecuación 2, se obtienen las señales moduladas, tanto para $k=1$ y $k=1.25$, las cuales se pueden observar en los gráficos de las figuras 5 y 6 para el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia en las figuras 7 y 8.

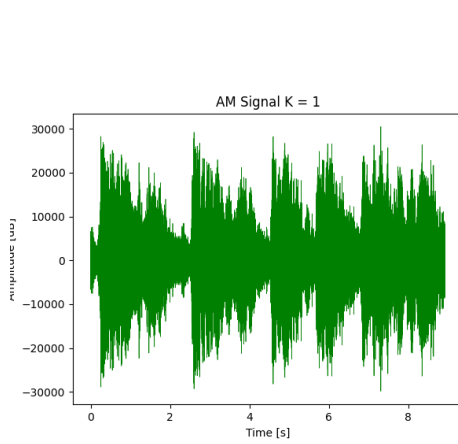


Figura 5: Señal modulada con K=1

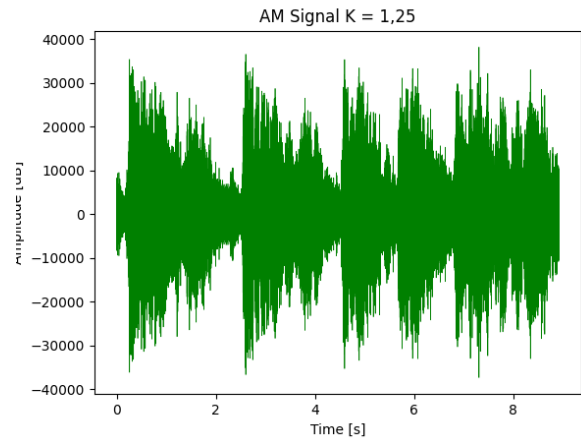


Figura 6: Señal modulada con K=1.25

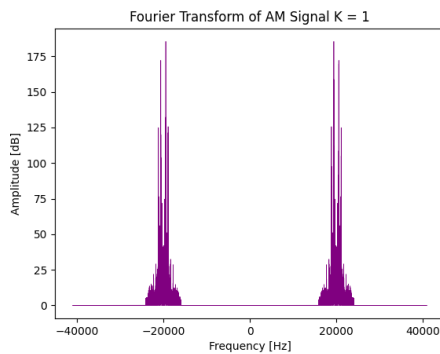


Figura 7: Transformada de Fourier de la señal modulada con K=1

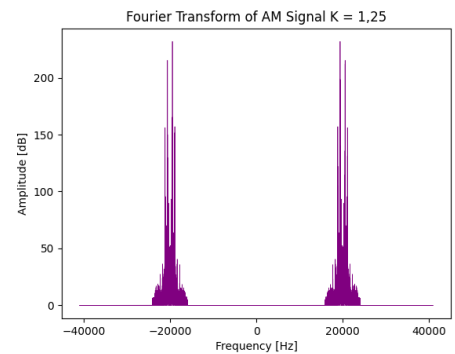


Figura 8: Transformada de Fourier de la señal modulada con K=1.25

Al aplicar la transformada de Fourier sobre la señal modulada se produce una convolución entre el mensaje y la señal portadora, como la transformada de un coseno corresponde a dos impulsos unitarios, la transformada del mensaje queda replicada en la frecuencia del coseno tanto positiva como negativa.

3.6. Demodulación

El proceso de demodulación consiste en recuperar el mensaje a partir de la señal modulada, el procedimiento consiste en multiplicar la señal modulada por la señal portadora para finalmente aplicar un filtro pasabajos obteniendo así la señal de audio. Esta multiplicación para el caso de esta experiencia de laboratorio queda de la forma:

$$z(t) = k \cdot m(t) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos(2w_c t)}{2} \right) \quad (3)$$

Luego de obtener $z(t)$ para ambas señales moduladas se aplica transformada de Fourier para ver su comportamiento en las frecuencias, obteniendo los gráficos presentes en las figuras 9 y 10.

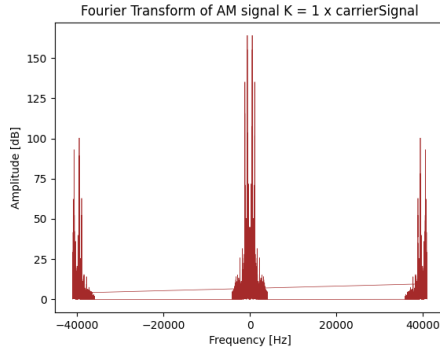


Figura 9: Transformada de Fourier de la señal modulada por la portadora con $K=1$

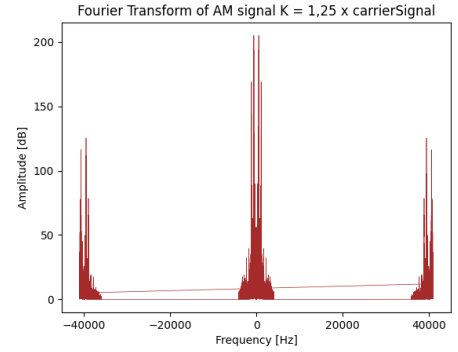


Figura 10: Transformada de Fourier de la señal modulada por la portadora con $K=1.25$

3.6.1. Creación de filtro pasabajos

Con el fin de recuperar la señal de audio se implementa un filtro pasabajos por medio de la función **butter()**. El filtro posee una frecuencia de corte en torno a 4096[Hz]

(obtenido por medio de la frecuencia máxima de la señal de audio), el cual elimina frecuencias que se encuentren por sobre este corte. La frecuencia de corte fue normalizada según de la frecuencia de Nyquist como se solicita en la documentación de Scipy para poder ser usadas con la función `butter()`, para la aplicación del filtro se usó la función `filtfilt()` que recibe un filtro y lo aplica a una señal. Al aplicar el filtro pasabajos con frecuencia de corte **4096 [Hz]** a ambas señales $z(t)$ conseguidas anteriormente se obtienen los gráficos presentes en las figuras 11 y 12.

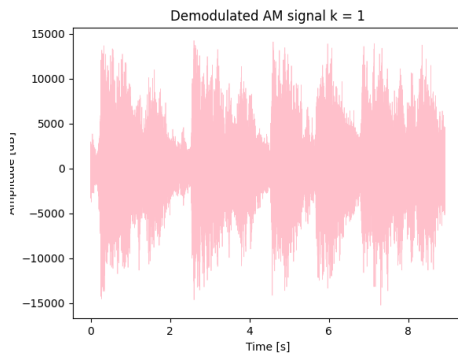


Figura 11: Gráfico de la señal demodulada con $K=1$

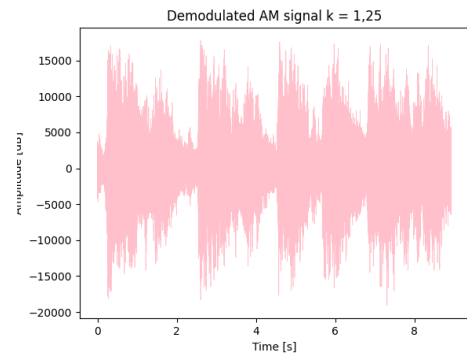


Figura 12: Gráfico de la señal demodulada con $K=1.25$

4. Análisis de resultados

En esta sección se busca responder y dar explicación a las preguntas propuestas en la experiencia de laboratorio de acuerdo con los resultados conseguidos.

4.1. Comprobación de resultados obtenidos

Con el fin de comprobar que los resultados obtenidos en esta experiencia hayan sido correctos es que se hace el siguiente análisis: Al comparar el gráfico de la figura 1 perteneciente a la señal de audio Handel con el gráfico de la figura 11 perteneciente a la señal demodulada con $K=1$, es posible observar que son prácticamente iguales lo que confirma que el proceso de modulación y demodulación fue correctamente aplicado, además es posible comparar los audios de la señal de audio Handel con el generado por la señal demodulada (**DemodulatedHandelk1.wav**) siendo estos prácticamente idénticos. Además en cada paso efectuado de tanto la modulación como la demodulación la teoría se cumplió, ya que esta es fácilmente contrastable por medio de los gráficos de la transformada de Fourier, donde cada gráfico esperado fue explicado en su correspondiente sección del desarrollo.

4.2. ¿Qué ocurre con el espectro de frecuencias de la señal original luego de modularla?

Al aplicar la transformada de Fourier sobre la señal modulada, se produce una convolución entre la transformada de la señal de audio Handel y la transformada del coseno. La transformada de la señal de audio Handel es desplazada debido a que la transformada del coseno son dos impulsos unitarios en 20.000 [Hz] y -20.000 [Hz], replicando en estas frecuencias la transformada de la señal de audio Handel. Esto es claramente observable en las figuras 7 y 8.

4.3. Ancho de banda usado por la señal modulada en AM

El ancho de banda(B) está dado por la diferencia entre la frecuencia máxima y mínima, tanto la frecuencia máxima como la mínima se encuentran desplazadas por la

frecuencia de la portadora, sin embargo, esta se cancela como se observa en la siguiente ecuación:

$$B = (fc + fm) - (fc - fm) \quad (4)$$

$$B = 2 \cdot fm \quad (5)$$

Por lo cual el ancho de banda esta dado por el doble de la frecuencia máxima de la señal de audio, al tener una frecuencia máxima de 571 [Hz] el ancho de banda corresponde a 1142 [Hz].

4.4. ¿Es posible recuperar la señal original independiente del índice de modulación utilizado?

No, no es posible recuperar la señal original independiente del índice de modulación utilizado, experimentando con el código adjunto a esta experiencia de laboratorio es posible darse cuenta de que con valores mayores a 1 en el índice de modulación k se empieza a producir perdida de información de la señal que se traduce en distorsiones. Para complementar teóricamente esta observación Ecured (2015) menciona respecto al índice de modulación: “El nivel más alto de modulación es del 1 y sucede cuando la amplitud de la portadora es igual a la amplitud de la moduladora ($A_m = A_p$). Si la amplitud de la moduladora es mayor que la portadora ($A_m > A_p$) entonces existirá sobremodulación y esto originará pérdida de información audible, trayendo como consecuencia distorsión.”

4.5. ¿Cuál es el costo, en términos de ancho de banda, de modular una señal?

Como se mencionó anteriormente el aplicar modulación no perjudica el ancho de banda ya que la frecuencia de la portadora es cancelada, así el ancho de banda depende únicamente la frecuencia máxima del mensaje, por lo cual en términos de ancho de banda no se paga un costo al modular una señal.

4.6. ¿Qué problemas pueden ocurrir al demodular una señal?

En la experiencia de laboratorio desarrollada se demoduló la señal Handel en un ambiente computacional, o sea un ambiente prácticamente perfecto sin interferencias de ningún tipo que afecten al proceso, en la vida real existe algo que se encuentra presente en toda transmisión de señales, el ruido. En la modulación AM la información se encuentra contenida en la amplitud, el ruido justamente afecta mucho a la amplitud, sumándose a esta. Además, no permite que sea removido, debido a que al estar en la amplitud que es el mismo sitio en el cual está la información, si se remueve ruido también se removerá información, lo cual no es deseado. Para poder emular este problema de la realidad, se agregó al código que acompaña a esta experiencia de laboratorio una sección en la cual se genera un ruido aleatorio para que este sea sumado a la señal Handel, para luego ser modulado y demodulado, en donde al comparar las figuras 13 y 1 se puede observar que, a pesar de haber seguido el proceso de demodulación, no es posible la eliminación de este ruido que termina alterando el mensaje. Es posible además el escuchar este resultado, el código adjunto genera el archivo DemodulatedNoise.wav producto de la emulación del ruido en la modulación y demodulación AM recién descrita.

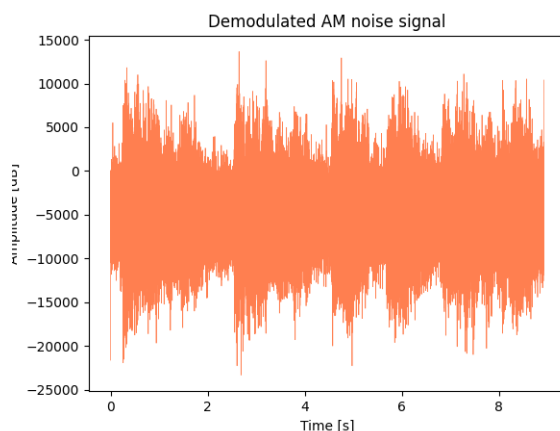


Figura 13: Resultado de demodular la señal con ruido

4.7. ¿Qué sucede con la señal modulada AM al utilizar un índice de modulación mayor a 1?

Como se respondió y explico anteriormente, al utilizar un índice mayor a 1 ocurre el fenómeno de sobremodulación el cual provoca perdidas en el mensaje original, siendo estas mayores mientras mayor sea el índice.

5. Conclusión

La experiencia de laboratorio N°2 presento algunas dificultades, siendo la principal de estas el entender cómo se debía cumplir el teorema del muestreo en este contexto y como esto luego requería el remuestrear la señal, otro problema que se presentó fue el graficar la señal portadora, debido a que no se podía apreciar la señal del coseno debido a su alta frecuencia. Los problemas fueron solucionados mediante la investigación, la lectura de documentaciones y bibliografías, por ejemplo, para graficar la señal portadora al investigar se descubrió que era necesario el limitar los puntos y reescalar el gráfico, por otro lado, el problema del remuestreo se solucionó estudiando respecto al teorema del muestreo y como este era importante para el proceso de Modulación. Finalmente se logró realizar la experiencia de laboratorio en forma completa, en la cual se valoran los aprendizajes adquiridos, como la aplicación práctica e implementación de la modulación en amplitud y el proceso de demodulación, en los cuales se logró experimentar, modificar parámetros y observar los resultados, logrando afianzar conceptos que en cátedra eran más abstractos.

Bibliografía

- de Música, E. U. (2011). *Introducción a los filtros digitales*. (<https://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/electivas/dsp/presentaciones/clase10.pdf>)
- Ecured. (2015). *Amplitud modulada*. (https://www.ecured.cu/Amplitud_modulada)
- Fernández, M. (2021). *Conceptos sobre señales*. (https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/16834/tema04_senales.pdf)
- Gobierno de la provincia de Buenos Aires, D. g. d. c. y. e. (2009). Sistemas de transmisión de la información. En *Tecnologías de la información y la comunicación*. Descargado de http://servicios.abc.gov.ar/lainstitucion/revistacomponents/revista/archivos/textos-escolares2007/TIC-P01-3P/archivosparadescargar/TIC_P01_3P_general.pdf
- Martínez, M. (2021). *¿qué es la transformada de fourier y para qué sirve?* (<https://www.nobbot.com/educacion/que-es-la-transformada-de-fourier-y-para-que-sirve/>)
- Moyano, J. M. D. (2005). *Ruidos e interferencias: Técnicas de reducción*. (https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/iec_4.pdf)
- Pérez, C. (2009). *Modulación de amplitud*. (https://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH5ST_Web.pdf)