

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



## Laboratorio 3

Integrantes: Marco Hernández  
Curso: Redes de computadores  
Profesor: Carlos González  
Ayudante: Nicole Reyes

8 de Enero de 2021

# Tabla de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	1
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>2</b>
2.1. Definición de señal . . . . .	2
2.2. Transformada de Fourier . . . . .	2
2.3. Modulación . . . . .	3
2.4. Demodulación AM . . . . .	5
2.5. Librerías de Python . . . . .	6
<b>3. Desarrollo de la experiencia</b>	<b>7</b>
3.1. Modulación AM . . . . .	11
3.2. Demodulación AM . . . . .	12
3.3. Modulación FM . . . . .	15
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>17</b>
<b>5. Conclusión</b>	<b>20</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>21</b>

# 1. Introducción

En la experiencia anterior se realizó procesamiento de imágenes aplicándole un filtro con la operación de convolución, así estudiando las imágenes como señales 2D. En esta ocasión se estudiará la transformación de las señales por medio de la modulación.

Hoy en día en el mundo de las comunicaciones, las señales cumplen un rol más que fundamental, de hecho, son el eje central de todo lo que tiene que ver con las comunicaciones, sin embargo, su transmisión no siempre resulta sencilla, dado que se deben construir canales que sean capaces tanto de transmitir, como de recibir la señal, pero para poder recibir algunas señales, se tendría que construir antenas con alturas kilométricas, lo que es imposible, para esto es que se les aplica a las señales una modulación. Que a grandes rasgos es llevar las señales a un espectro de frecuencias más altas para así necesitar canales más pequeños para captarlas y transmitirlos.

Para llevar a cabo esto, la presente experiencia consistirá en modular una señal de prueba otorgada en AM y FM, para después graficar los resultados de ambos procesos y determinar el ancho de banda en ambos casos, para después finalmente aplicar una demodulación a la señal AM, para verificar si la operación fue realizada de manera correcta y como en las ocasiones anteriores, todo este trabajo se desarrollará con por medio de programación en python

## 1.1. Objetivos

1. Implementar la función de modulación AM y FM
2. Implementar Función de demodulación AM
3. Resolver el problema por medio de programación en lenguaje python

## 2. Marco Teórico

A continuación se pasa a mencionar conceptos importantes para el desarrollo de la experiencia de laboratorio

### 2.1. Definición de señal

Como se menciona anteriormente, en la presente experiencia se trabajara con una señal de audio, pero antes de extraer toda la información del archivo, es necesario saber que es una señal. “ *Una señal son ondas electromagnéticas (rango de frecuencias) propagadas a través de un medio de transmisión...*” Dakar (2010). Por lo tanto, una señal, es una energía, la cual es interpretada por diversos dispositivos y existen de distintos tipos como lo son

- Señales analógicas: Son usadas para la transmisión de elementos de vídeo y de sonido. Son señales de tipo continuo, con un comportamiento senoidal.(viu (2018))
- Señales digitales: La información de la señal se transmite utilizando códigos en binario, transformando las señales senoidales a ondas del tipo cuadradas, dando paso a una señal que no es continua. (viu (2018))

### 2.2. Transformada de Fourier

Las señales vienen representadas como una función que varia en el tiempo, pero para completar el análisis, es importante llevar esa función al dominio de las frecuencias, para esto es que se utiliza la transformada de Fourier.

La transformada de Fourier esta dada por la siguiente formula.Lathi (2003):

$$\mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Figura 1: Formula transformada de Fourier.

En la que  $f(t)$  es la función que representa a la señal,  $\omega$  que es la frecuencia, y  $t$  el tiempo. Como se puede apreciar es una integral que toma intervalos de menos infinito a

infinito positivo.

Otra herramienta que también será utilizada en el desarrollo de este laboratorio es la transformada de Fourier inversa, que es para llevar la función del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, cuya fórmula es la siguiente. Lathi (2003)

$$\mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Figura 2: Fórmula transformada de Fourier inversa.

En este caso  $F(\omega)$  es la función de la señal con la frecuencia siendo la variable independiente, y  $t$  al igual que en el caso anterior es el tiempo

## 2.3. Modulación

La modulación es una técnica que se usa como base para las señales en sistemas de comunicación. La modulación es un paso para poder ajustar las señales a los medios que se disponen para poder transmitirla

“Many applications require the use of signals that are not well matched to the required media.... We can often modify the signals to obtain a better match. Today we will introduce simple matching strategies based on modulation.” (Muchas aplicaciones requieren del uso de señales que no se ajustan al medio requerido... Podemos de vez en cuando modificar las señales para obtener mejor partido de la señal. Hoy vamos a introducir estrategias de ajuste simples basadas en modulación). Oppenheim (2001)

- Modulación AM (modulación por amplitud) : “Multiplying a signal by a sinusoidal carrier signal is called amplitude modulation. The signal “modulates” the amplitude of the carrier”. (Multiplicar la señal por una señal portadora sinusoidal es llamado modulación por amplitud . La señal, modula la amplitud de la portadora) Oppenheim (2001)
- Modulación FM (modulación por frecuencia): La modulación FM es otro tipo de transformación que se le hace a una señal, “signal modulates instantaneous frequency of ca-

rier.” (La señal modula la frecuencia instantánea de la portadora.) Oppenheim (2001)  
 lo que quiere decir que a diferencia de la AM, la señal es modulada en la frecuencia de  
 la portadora, por lo que el mensaje se codifica en los cambios de frecuencia de la señal

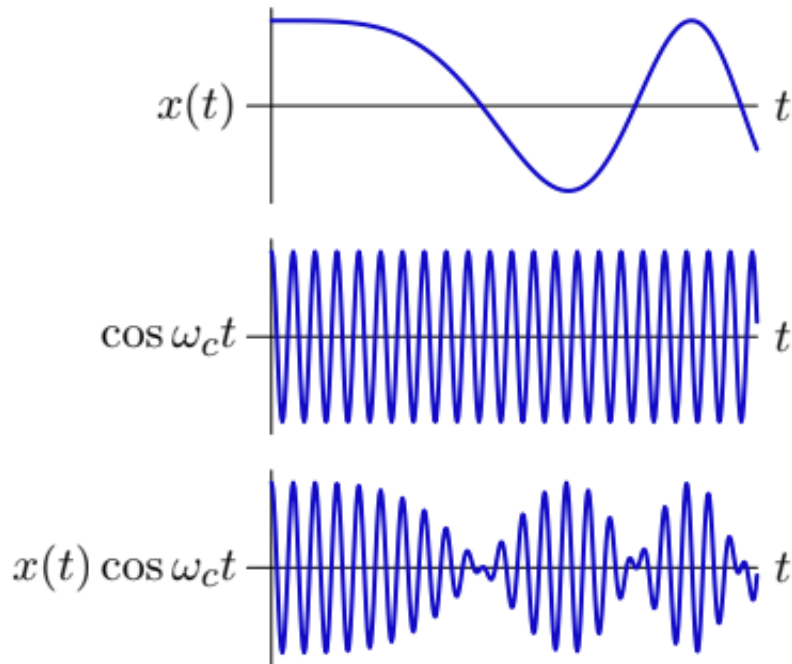


Figura 3: Ejemplo de modulación AM.

$$\text{FM: } y_3(t) = \cos \left( \omega_c t + k \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \right) = \cos \left( \omega_c t + \frac{k}{\omega_m} \sin(\omega_m t) \right)$$

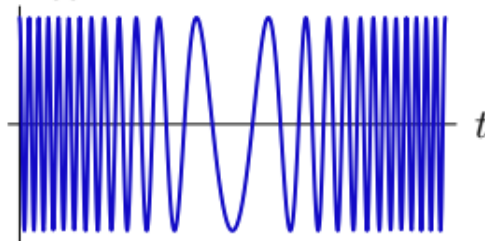


Figura 4: Ejemplo de modulación FM.

## 2.4. Demodulación AM

La demodulación es la acción de invertir los cambios de la señal producto de la modulación. Existen distintos tipos de demodulación, pero la que se ocupará en la presente experiencia es la denominada demodulación síncrona que se define de la siguiente manera: “X can be recovered by multiplying by the carrier and then low-pass filtering. This process is called synchronous demodulation”. (X puede ser recuperada por medio de la multiplicación por la portadora y luego aplicar un filtro de pasa bajos. Este proceso es denominado demodulación síncrona) Oppenheim (2001)

$$y(t) = x(t) \cos \omega_c t$$

$$z(t) = y(t) \cos \omega_c t = x(t) \times \cos \omega_c t \times \cos \omega_c t = x(t) \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega_c t) \right)$$

Figura 5: Proceso algebraico para la demodulación.

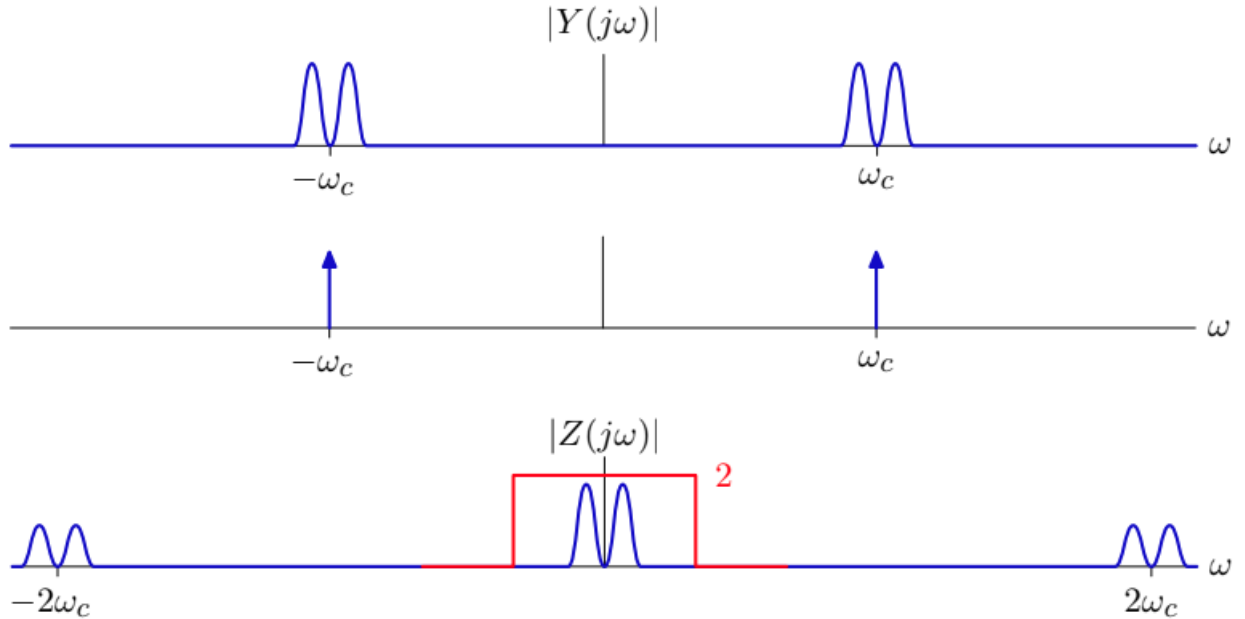


Figura 6: Demodulación gráficamente.

Como se ve en la figura 4 se debe multiplicar nuevamente la señal modulada por un coseno con la misma frecuencia, la transformada de fourier de la resultante, contiene la información de la señal original, por lo que para recuperar esa información se hace el filtro pasa bajos.

## 2.5. Librerías de Python

En cuanto a las herramientas que se usaran a nivel de programación, para desarrollar la experiencia de laboratorio se usara el lenguaje de programación Python, con las herramientas que otorga la librería SciPy de python la cual se puede ver en sci (2020). Para poder obtener ciertos valores en el tiempo de la señal de prueba, se hace difícil, ya que no se posee una expresión matemática que describa el comportamiento de la señal de prueba, por lo que con la información que se extrae de la lectura del archivo, se van a interpolar los valores y esto también se hará con la librería `sciPy`, específicamente con la función `interp1D` del modulo `interpolate` de `sciPy`. int (2020)

En dicha librería se otorgan funciones de calculo científico como lo es la función `fft2()` que es la que calcula la transformada de Fourier en dos dimensiones, que en esta ocasión se le realizara a imágenes.

Para las representaciones gráficas de los resultados que se obtengan, se utilizara la librería `matplotlib`, la cual otorga todas las herramientas necesarias para desplegar gráficos con la información necesaria.



### 3. Desarrollo de la experiencia

Para el desarrollo de la actividad se definió la clase signal, la cual tendrá los atributos y métodos que tengan que ver con la lectura, manipulación y escritura de la señal, es decir, en esta clase de python, habrá métodos de la lectura de la señal desde un directorio, las funciones de modulación AM y FM, de ajuste de señal y de la transformada de fourier de la señal en el momento.

Antes de partir con el desarrollo de las actividades propuestas primero se define la función de la portadora AM:

```
# AM Carrier signal function
# Input:
#   t: time value or values to calculate the function
#   fc: Carrier frequency
#   k: constant, 1 by default
# Output : value or array with values of the carrier function in t
def amCarrier(t,fc, k = 1):
    return k*np.cos(2*np.pi*fc*t)
```

Figura 7: Código de funciones de señales portadoras.

Después se procede primero que todo a leer el archivo de prueba que ha sido otorgado, lo cual se hace con la función definida a continuación:

Para poder realizar la modulación AM, hay que extraer muestras de valores de la función que representa la señal de origen, que en este caso es el archivo de audio de prueba. Primero, y según como indica la teoría de muestreo la cantidad de muestras debe ser de dos veces la frecuencia y como estándar se usa la frecuencia que usa la portadora, ya que después para modular se tendrá que multiplicar los valores de la función de la señal original y los valores de la función de la portadora, por lo que ambos arreglos deben tener la misma extensión y por ende, para ambas señales se saca muestras con frecuencias de dos veces la frecuencia de la portadora. El siguiente aspecto importante, es que solo se tienen los

```

# Method to read a wavfile and extract the initial info
# Input:
#   filepath: path of where the desired wav file is allocated
def readWavFile(self,filePath):
    self.path = filePath
    self.sourceRate, self.data = wavfile.read(filePath)
    audioArrayLenght = len(self.data)
    self.duration = audioArrayLenght / self.sourceRate
    self.timeDomain = np.linspace(0,self.duration,audioArrayLenght)

```

Figura 8: Código de función de lectura de archivo wav.

valores de muestras de la señal original, no se posee una expresión matemática que dibuje el comportamiento de la señal, por lo que para obtener los valores que se desean (valores cada  $1/2^*$  frecuencia portadora, en el intervalo de la duración de la señal original), se debe interpolar con los valores que ya se tienen u obtener una función matemática que represente el comportamiento de la señal de origen, para esto ultimo se usa la función de python `interp1d` y después con esta función se calculan los valores que se usaran para modular la señal, todo esto se ve en la siguiente imagen:

```

# Method to interpolate the data wich will be modulated
# Input:
# f: frequency of the carrier signal
def signalExtract(self, f):

# This is the frequency wich is used to extract samples of the function to rebuild the si
gnal, according to the sampling theorme it must be at leas 2 times the frequency, in this
time it is 2.6
    Fs = 2.6*f
    sampleStep = float(1/Fs)
    tn = np.arange(0, self.duration, sampleStep)
    numberSamples = len(tn)
    # This is to recreate the function that represents the wav file data
    interpolatedF = interpolate.interpld(self.timeDomain, self.data)
    self.sampleTimeRange = np.linspace(0, self.duration, numberSamples)
    self.data = interpolatedF(self.sampleTimeRange)
    self.sourceRate = numberSamples/self.duration

```

Figura 9: Código de función de ajuste de datos para modulación.

Para tener un punto de partida y saber las características de la señal original se gráfica la señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia:

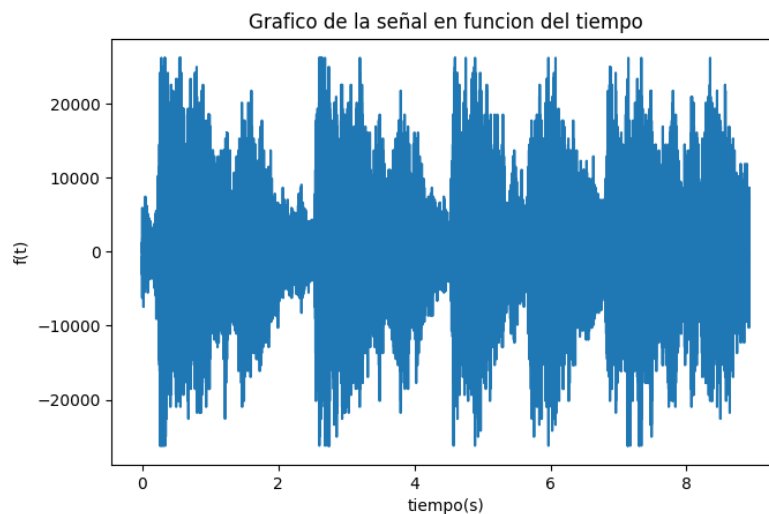


Figura 10: Señal original en el dominio del tiempo.

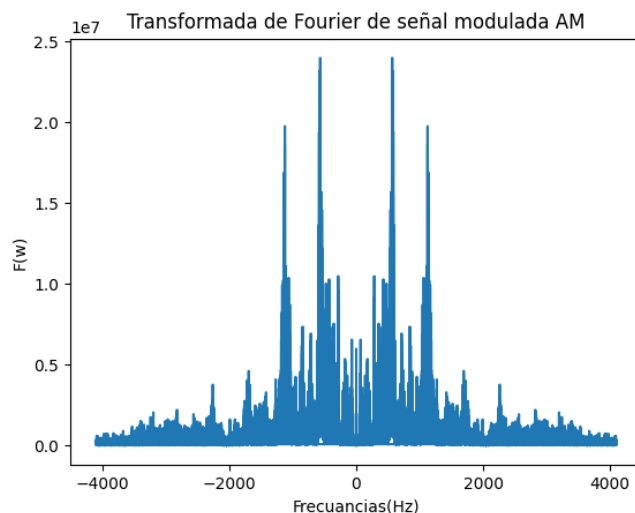


Figura 11: Señal original en el dominio de la frecuencia.

Además para comprobar los resultados posteriormente, a continuación se presenta el gráfico de la transformada de fourier(la portadora tiene una frecuencia de 20000 Hz) :

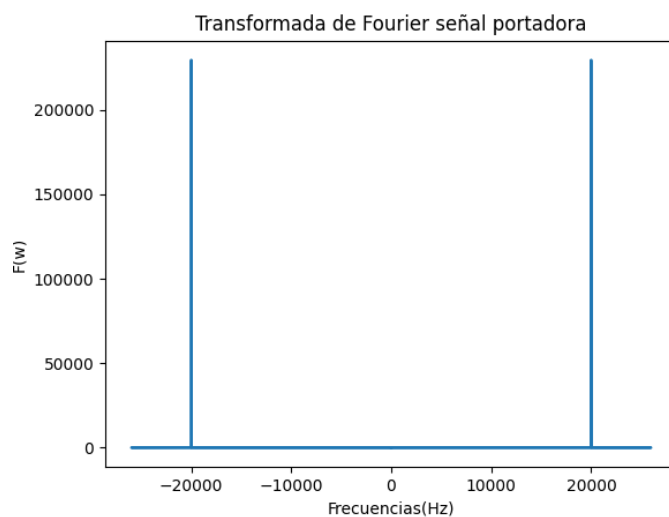


Figura 12: Señal portadora AM en el dominio de la frecuencia.

No se muestra el gráfico de la función de la portadora en el tiempo debido a que se requiere una alta frecuencia y por esto la gráfica de matplotlib no ofrece una buena lectura de esta

### 3.1. Modulación AM

Para la modulación AM primero se debe elegir una frecuencia para la señal portadora, que debe ser mucho mayor a la frecuencia máxima de la señal original, por lo mismo, para los resultados que se presentan en este documento se usa una frecuencia de 20000 Hz que cumple con el criterio anterior. Una vez hecho esto se usa la función especificada en la figura 9 para preparar los datos de la señal original, después se calculan los valores de la señal portadora y finalmente se multiplican ambos vectores para realizar la modulación, finalmente se ajustan los valores del dominio de tiempo para posteriormente graficar la señal modulada, Los resultados de el procedimiento se ve en las figuras 14 y 15:

```
# Method to apply the AM modulation to the signal
# Input:
#   freq: frequency of the carrier signal
def amModulation(self,freq):
    carrierData = amCarrier(self.sampleTimeRange,freq)
    self.data = self.data * carrierData
    self.timeDomain = np.linspace(0, self.duration, len(self.data))
```

Figura 13: Código función de modulación AM.

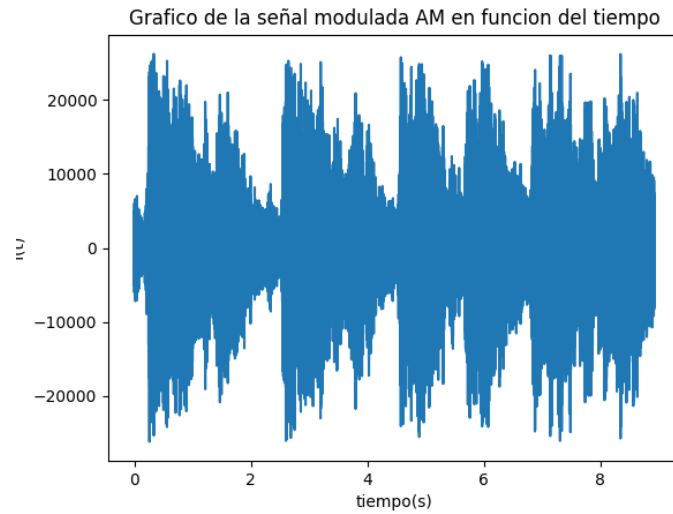


Figura 14: Señal modulada AM en el dominio del tiempo.

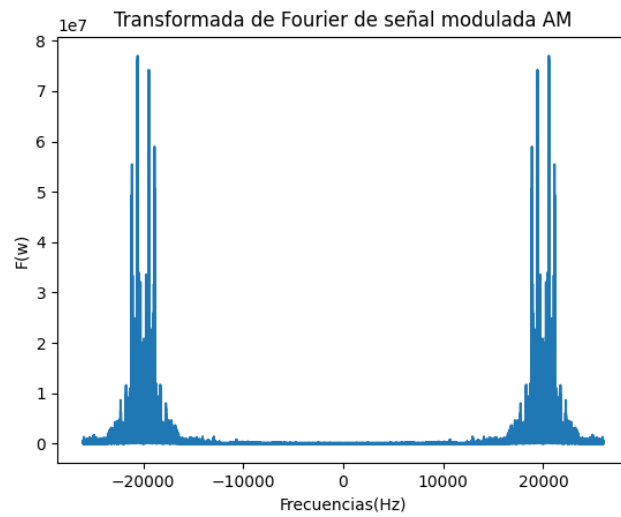


Figura 15: Señal modulada AM en el dominio de la frecuencia.

### 3.2. Demodulación AM

El siguiente paso fue recuperar la información de la señal original a partir de la señal modulada, para esto primero se debe volver a multiplicar la señal modulada por la portadora con la misma frecuencia anterior, como se muestra en la figura 4 y posteriormente

se debe aplicar la transformada de fourier al resultado para después por medio de un filtro de paso bajo, que en esta ocasión filtrara las frecuencias que sean mayores a 4000 Hz, dado que ese es el ancho de banda de la señal original, así se recupera la información en el dominio de la frecuencia de la señal original, para recuperar la información del dominio del tiempo se aplica la transformada de fourier inversa a los datos filtrados anteriormente:

```
# Method to apply the AM signal demodulation
# Inputs:
#   f: frequency of the carrier signal
#   filterfreq: frequency to the low pass filter
#   k: constant, 1 by default
def amDemodulation(self, f, filterfreq, k = 1):
    self.data = k*self.data*np.cos(2*np.pi*f*self.sampleTimeRange)
    self.fourierTransform()
    self.fourierData = FirFreqFilter(self.fourierData,self.freqDomain,filterfreq)
    self.data = ifft(self.fourierData)
```

Figura 16: Código función de demodulación AM.

Se muestran los resultados de esta operación en los graficos de la función y la transformada de fourier de la señal demodulada:

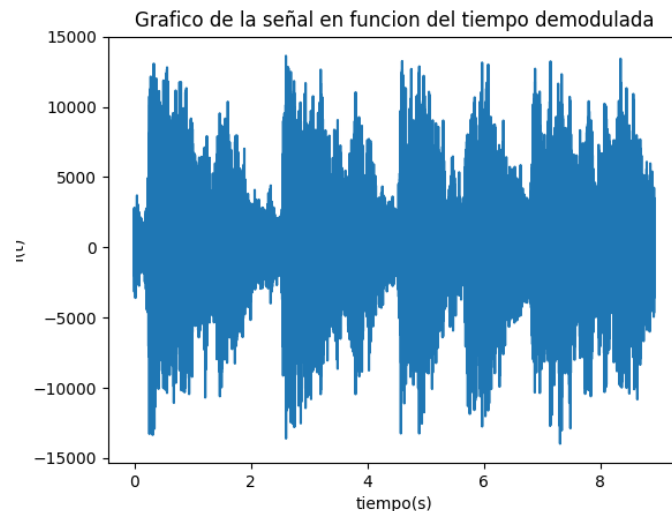


Figura 17: Señal demodulada AM en el dominio del tiempo.

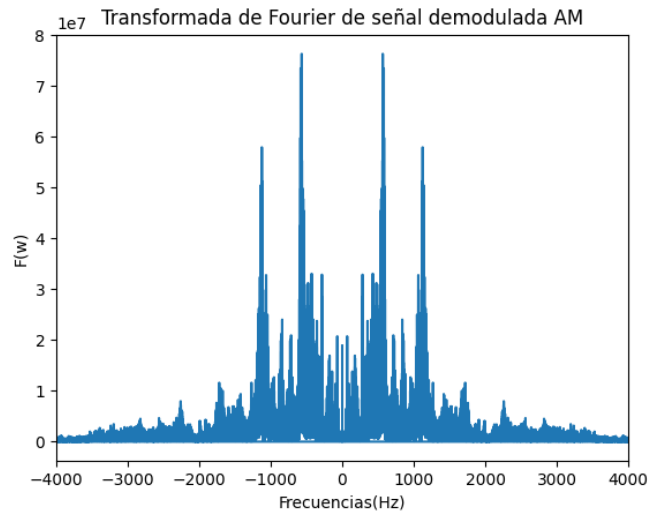


Figura 18: Señal demodulada AM en el dominio de la frecuencia.

Finalmente se guardan los resultados de este proceso en un nuevo archivo .wav y para esto se utiliza la siguiente función:

```
# Method to write a new wav file with the current data of the signal object
# Input:
#   name: name of the output file
def write(self, name=None):
    data = np.asarray(np.real(self.data), dtype=np.int16)
    wavfile.write(name, int(self.sourceRate), data)
```

Figura 19: Código función de demodulación AM.



### 3.3. Modulación FM

En cuanto a la modulación FM, no se necesita una señal portadora, solamente se debe usar la formula de la figura 11 donde la dificultad se presentaba al calcular la integral, lo cual se soluciona con la función `cumtrapz` del paquete `integrate` de `scipy`, esta, obtiene la suma acumulativa con la regla del trapecioide. Esta suma luego se pasa al coseno para llevar a cabo la modulación, los resultados de la modulación FM se muestran en las figuras

```
# Method to apply the FM modulation to the signal
# Input:
#   freq: frequency of the carrier signal
def fmModulation(self, freq, k = 1):
    iSum = integrate.cumtrapz(self.data, self.sampleTimeRange, initial=0)
    self.data = np.cos(2*np.pi*freq*self.sampleTimeRange+ k*iSum)
    self.timeDomain = np.linspace(0, self.duration, len(self.data))
```

Figura 20: Código función de modulación FM.

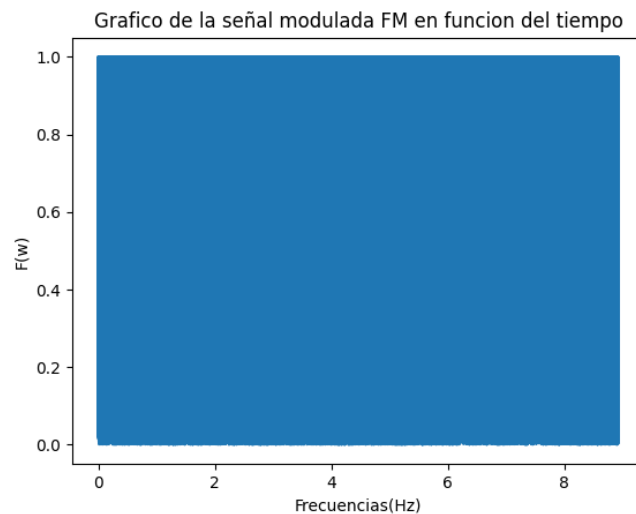


Figura 21: Señal modulada FM en el dominio del tiempo.

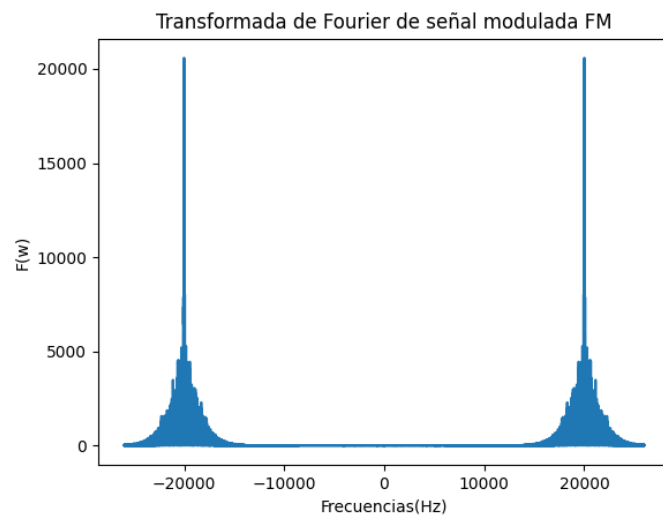


Figura 22: Señal modulada FM en el dominio de la frecuencia.

## 4. Análisis de resultados

A partir de los resultados expuestos anteriormente, se pasa ahora a analizarlos en base a los conocimientos ya adquiridos en el curso.

En cuanto a la modulación AM, para que el resultado sea correcto, la frecuencia de la portadora debía ser mucho mayor a la frecuencia máxima de la señal original, es por esto que se usó tanto para el proceso de modulación como de demodulación una frecuencia de 20000 Hz. En vista a esto, se puede apreciar en la figura 12 que la transformada de Fourier de la señal modulada en AM es correcta, dado que el espectro de la señal original se repite dos veces entorno a las frecuencias -20000 Hz y 20000 Hz, dando el doble de ancho de banda que la señal original porque la parte negativa de la señal original se lleva ahora al lado positivo de las frecuencias después de aplicar la modulación. En cuanto al gráfico en el dominio del tiempo un resultado correcto es que la señal se replique con la sinusoidal, pero debido a que la frecuencia es tan alta, la sinusoidal no se aprecia, más bien, se ve una replica de la señal original (figura 10), lo que hace suponer que el resultado es correcto.

Después al resultado de la modulación se le aplicó la demodulación a la señal modulada anteriormente, el resultado de esta operación se ve en las figuras 17 y 18, en la primera, se puede ver que la señal en función del tiempo sufrió una pequeña modificación, dado que las amplitudes son menores respecto a las de la señal antes de ser modulada, y en cuanto a la transformada de Fourier, esta es casi idéntica a la transformada de Fourier de la señal original solamente que los valores de la  $F(w)$  de la señal demodulada son mayores a los de la señal original. Sin embargo, la mayor prueba de que el resultado es el esperado es escuchar el archivo de salida con la señal demodulada, en ella se aprecia que el sonido es muy parecido al del archivo original, solamente se escucha con un volumen un poco más bajo en comparación al archivo de prueba, lo que tiene sentido debido a que la amplitud de la señal nueva es menor y el volumen de un sonido depende de la amplitud.

Todo esto lleva a preguntar ¿Cuáles son los usos de la modulación AM? La respuesta a esto, en base a lo aprendido con la cátedra de la asignatura, es que la modulación AM se usa para poder ajustar una señal a un medio de transmisión. Por ejemplo, algunas radioemisoras utilizan la modulación AM, también se usa para la comunicación radial entre

aviones o en señales de televisión. Dentro de las ventajas de la modulación AM es que la demodulación de estas señales es tan simple que los receptores para ellas son baratos y de fácil acceso.

En cuanto a la modulación FM, el funcionamiento de esta respecto a la modulación AM es distinto, ya que la información se codifica en términos de los cambios de frecuencia de la señal modulada, al ver el resultado de la señal modulada FM en el dominio del tiempo, no se puede apreciar si el resultado es correcto o no, dado que la frecuencia que se usa para modular es tan alta que se forma una cuadrado solido de color azul. Otra manera de apreciar si el resultado es el deseado o no es viendo el resultado en el dominio de las frecuencias, donde se ven resultados distintos a la modulación AM en cuanto a los valores de  $F(w)$  pero la forma de ambos es la misma y ambos están en frecuencias de 20000 Hz, que es la frecuencia con la que se realizan ambas modulaciones y también posee un ancho de banda del doble de la transformada de la señal original porque la parte negativa también se pasa al lado positivo en esta modulación.

La utilidad de la modulación FM es la misma que la de la modulación AM, la cual es ajustar la señal que se quiere enviar a un medio de transmisión, sin embargo, como es evidente, ambos lo hacen de maneras distintas, en el caso de la modulación FM, lo hace por medio de las frecuencias y como se menciona anteriormente y como se ha visto en las clases de cátedra, la información de la señal ve en las variaciones de la frecuencia de la señal y dentro de las ventajas que se tienen con la modulación FM es que la señal es más resistente al ruido y esto se explica por lo mismo que se menciona anteriormente, a que la lectura de la información se ve en las variaciones de frecuencias de la señal. “La frecuencia modulada es usada comúnmente en las radiofrecuencias de muy alta frecuencia por la alta fidelidad de la radiodifusión de la música y el habla (véase Radio FM). El sonido de la televisión analógica también es difundido por medio de FM” Mod (2020)

Los costos de la demodulación en costos de ancho de banda, en el caso de la modulación AM se tiene certeza de que la señal resultante tendrá el doble de ancho de banda que la señal original. Para la modulación FM como mínimo se tendrá un ancho de banda igual al doble del ancho de banda de la señal original, este valor depende de la constante  $k$  presente en la formula de la modulación FM. Ambos valores se comprueban experimentalmente con

los resultados anteriormente expuestos.

Los problemas que pueden ocurrir al demodular una señal, es que dependiendo de la frecuencia con la que se hace, esta puede que no recupere bien el mensaje, por lo que hay que asegurarse de que la frecuencia con la que se hace sea mucho más grande que la frecuencia máxima de la señal. Lo otro que se apreció experimentalmente es la pérdida de amplitud con respecto a la señal original, lo que repercute en el volumen de la señal. Finalmente, principalmente en la modulación AM se encuentra el problema de que es muy fácil que se agregue ruido a la señal cuando se modula la señal, lo que puede salir en la señal demodulada,

## 5. Conclusión

Ante todo lo expuesto anteriormente, se puede decir que se logran los objetivos planteados al inicio del laboratorio. Primero se implemento la función de demodulación, la cual para ser utilizada tenia que primero “arreglar” los datos por medio de una interpolación, dado que no se tenia una función que representara el comportamiento del archivo de prueba. Los resultados de la modulación AM se consideran correctos y esto se ve principalmente en el gráfico de la transformada, y los resultados están correctos porque el resultado es el esperado al multiplicar impulsos por una transformada y queda el espectro original replicado dos veces entorno al 0 en la frecuencia que se uso cal modular (20000 Hz)

También se logro implementar de manera correcta la modulación FM dado que los resultados son los esperados, en el dominio del tiempo, es difícil apreciar los resultados de la modulación debido a la alta frecuencia que se uso para modular hace que la senoide se replique 20000 veces en 8 segundos lo que hace muy difícil apreciar las variaciones de frecuencias, sin embargo, en el gráfico de la transformada al igual que en la modulación AM, se ve el espectro original replicado dos veces entorno al eje de las ordenadas, con la frecuencia a la que se deseaba modular. Por lo que se logra el objetivo de implementar ambas funciones de modulación.

Finalmente se buscaba demodular la señal que se modulo por amplitud (AM), y para lograrlo se multiplico nuevamente la señal modulada y posteriormente se le aplico un filtro pasa bajos a la transformada de fourier de la señal resultando de la multiplicación y el resultado es el esperado ya que se tiene una transformada de fourier similar a la de la señal original y al aplicar la transformada inversa se obtiene una señal casi idéntica a la original, salvo que tiene una amplitud un poco menor al de la señal original, lo que se supone es un efecto de la de modulación aplicada. Lo más relevante para saber que los resultados son correctos, es que el archivo .wav saliente se escucha casi igual al original, solo con un volumen más bajo, por la baja en la amplitud.

Por lo tanto se cumplen todos los objetivos planteados al inicio, y por mejorar queda ampliar el uso del programa para cualquier archivo .wav y no solo para el de prueba.

# Bibliografía

- (2020). Documentación scipy. [Online] <https://www.scipy.org/docs.html>.
- (2020). Documentación scipy interpolate. [Online] <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/interpolate.html>.
- (2020). Usos modulación fm. [Online] <https://sites.google.com/site/senalesg/unidad-ii/modulacion/-modulacin-de-frecuencia-fm>.
- Dakar, V. (2010). Fundamentos de telecomunicacion. [Online] [https://www.itmerida.mx/panel/posgrado/archivos/mi/Fundamentos%20de%20Telecomunicaciones%20Unidad%201%20\(1\).pdf](https://www.itmerida.mx/panel/posgrado/archivos/mi/Fundamentos%20de%20Telecomunicaciones%20Unidad%201%20(1).pdf).
- de la Rosa, J. (2010). Fundamentos teoricos. [Online] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11375/fichero/MEMORIA%252FFundamentos+teoricos.pdf>.
- Lathi (2003). *Sistemas de comunicación*.
- Oppenheim, A. (2001). Signals and systems. [Online] <https://ocw.mit.edu>.
- viu (2018). Diferencias entre señal analogica y digital. [Online] <https://www.universidadviu.com/diferencias-senal-analogica-digital/>.