



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN LUIS  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS Y NATURALES  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON O.S.D.

**Asignatura:**

**Comunicaciones I**

**Trabajo Practico N° 3**

**“Modulación Analógica”**

**Estudiantes:**

Marcos Lucero

Nahuel Ramires

Agustín Cappiello

**Profesores Responsables:**

Alejandro Marwan Geraiges Magrini.

Roberto Kiessling.

**Año:**

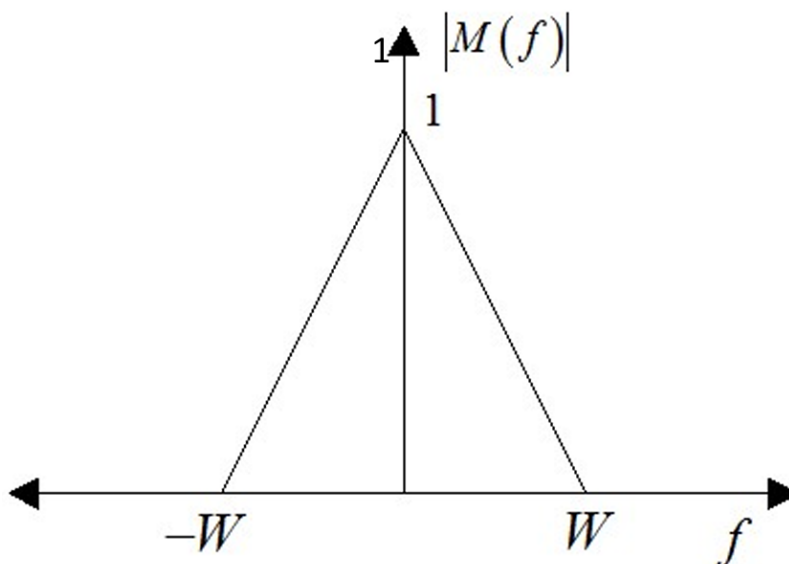
2025

## Índice

1. Ejercicio 1	1
2. Actividad 2	2
3. Ejercicio 3	4
4. Ejercicio 4	4
5. Ejercicio 5	5
6. Ejercicio 6	5
7. Ejercicio 7	6

### 1. Ejercicio 1

En la Fig. 1 se puede observar el espectro en frecuencias de la señal de mensaje  $m(t)$ .



**Figura 1:** Espectro en frecuencias de la señal de mensaje  $m(t)$

El ancho de banda de la señal es de 1000 Hz, y es aplicada a un modulador producto, el cual posee una portadora  $A\cos(2\pi f t)$ . La señal modulada  $s(t)$  es luego aplicada a un Detector Coherente como el indicado en la Fig. 2 del Ejercicio 4.

- Graficar el espectro obtenido en la salida del detector, para  $f = 500$  Hz. Suponer la portadora del modulador producto en perfecto sincronismo con la del Detector Coherente. ¿Se recibe la señal enviada? Justifique.
- Proceder de manera similar al punto anterior, pero esta vez suponiendo  $f = 10$  kHz.
- ¿Cuál es la mínima frecuencia de portadora que debería emplearse de manera tal de poder recuperar  $m(t)$  a través de  $s(t)$ , sin distorsión?

## 2. Actividad 2

**Un transmisor con modulación de amplitud tiene como entrada una señal  $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$  con  $A_m = 3 \text{ V}$  y  $f_m = 600 \text{ Hz}$ . Si la portadora posee una amplitud de  $10 \text{ V}$  y una frecuencia de  $1 \text{ kHz}$ .**

**a) Calcular de manera analítica la señal de salida del modulador en tiempo y en frecuencia, graficando además los resultados. Suponer un 90 % de porcentaje de modulación. ¿Es posible realizar una detección de envolvente sobre la señal  $s(t)$ ? o ¿se requiere una detección coherente?**

En este caso la modulación es de tipo AM (DSB con portadora). La señal portadora modulada de salida se expresa como:

$$s(t) = A_c [1 + k_a A_m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$$

donde:

$A_c$  es la amplitud de la portadora

$A_m$  es la amplitud del mensaje

$f_c$  es la frecuencia de la portadora

$f_m$  es la frecuencia de la señal moduladora

$k_a$  es el la sensibilidad de amplitud del modulador

$\mu = k_a A_m$  es el índice de modulación

Al reemplazar los valores dados por el enunciado se obtiene:

$$s(t) = 10 [1 + 0,9 \cos(2\pi \cdot 600 t)] \cos(2\pi \cdot 1000 t)$$

Aplicando la propiedad trigonométrica del producto de cosenos:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)],$$

La expresión resultante se desarrolla como:

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{A_c \mu}{2} [\cos(2\pi(f_c + f_m)t) + \cos(2\pi(f_c - f_m)t)]$$

Reemplazando los valores numéricos en la expresión anterior:

$$s(t) = 10 \cos(2\pi \cdot 1000 t) + 4,5 \cos(2\pi \cdot 1600 t) + 4,5 \cos(2\pi \cdot 400 t)$$

**El desarrollo en frecuencia es el siguiente:**

La Transformada de Fourier de  $s(t)$  está formada por tres deltas centradas en las frecuencias indicadas:

$$S(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{A_c \mu}{4} [\delta(f - (f_c + f_m)) + \delta(f + (f_c + f_m)) + \delta(f - (f_c - f_m)) + \delta(f + (f_c - f_m))]$$

Reemplazando por valores numéricos:

$$S(f) = \frac{10}{2} [\delta(f - 1000) + \delta(f + 1000)] + \frac{9}{4} [\delta(f - 1600) + \delta(f + 1600) + \delta(f - 400) + \delta(f + 400)]$$

Para que la envolvente de la señal  $s(t)$  pueda ser detectada la frecuencia de la onda portadora debe cumplir que  $f_c \gg W$ . En este caso no se cumple por lo que es necesario un detector coherente para que sea posible.

En la Fig.2 se muestra tanto la señal en el tiempo como su espectro de la señal modulada  $s(t)$ .

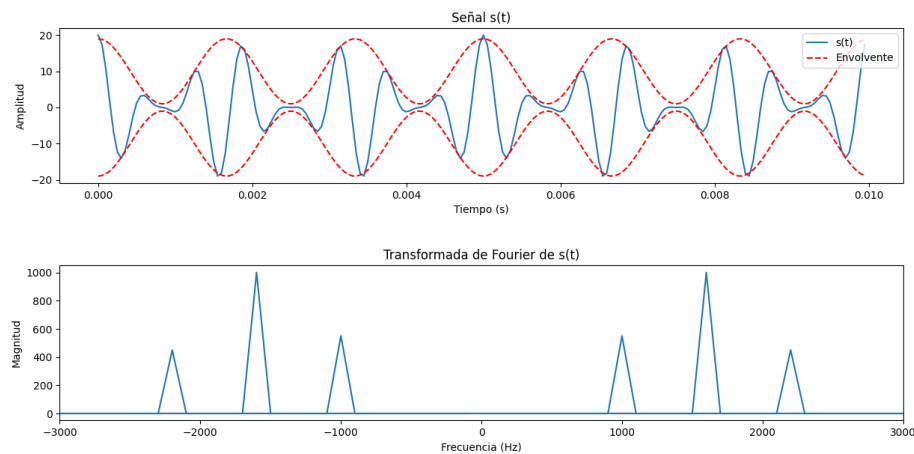


Figura 2: Señal modulada.

**b) Modificar la frecuencia de portadora a  $f_c = 10f_m$  y graficar  $s(t)$  para modulaciones 90 % 60%, 20 % y 110 %. ¿Es posible detección de envoltente en todos los casos?**

Expresión analítica para un 90 % de  $s(t)$  y  $f_c = 10f_m$ :

$$s(t) = 10 [1 + 0,9 \cos(2\pi \cdot 600t)] \cos(2\pi \cdot 6000t)$$

Expresión analítica para un 60 % de  $s(t)$  y  $f_c = 10f_m$ :

$$s(t) = 10 [1 + 0,6 \cos(2\pi \cdot 600t)] \cos(2\pi \cdot 6000t)$$

Expresión analítica para un 20 % de  $s(t)$  y  $f_c = 10f_m$ :

$$s(t) = 10 [1 + 0,2 \cos(2\pi \cdot 600t)] \cos(2\pi \cdot 6000t)$$

Expresión analítica para un 110 % de  $s(t)$  y  $f_c = 10f_m$ :

$$s(t) = 10 [1 + 1,1 \cos(2\pi \cdot 600t)] \cos(2\pi \cdot 6000t)$$

En la Fig.3 se muestra las gráficas en el dominio del tiempo de la señal  $s(t)$  para los distintos factores de modulación  $\mu$ .

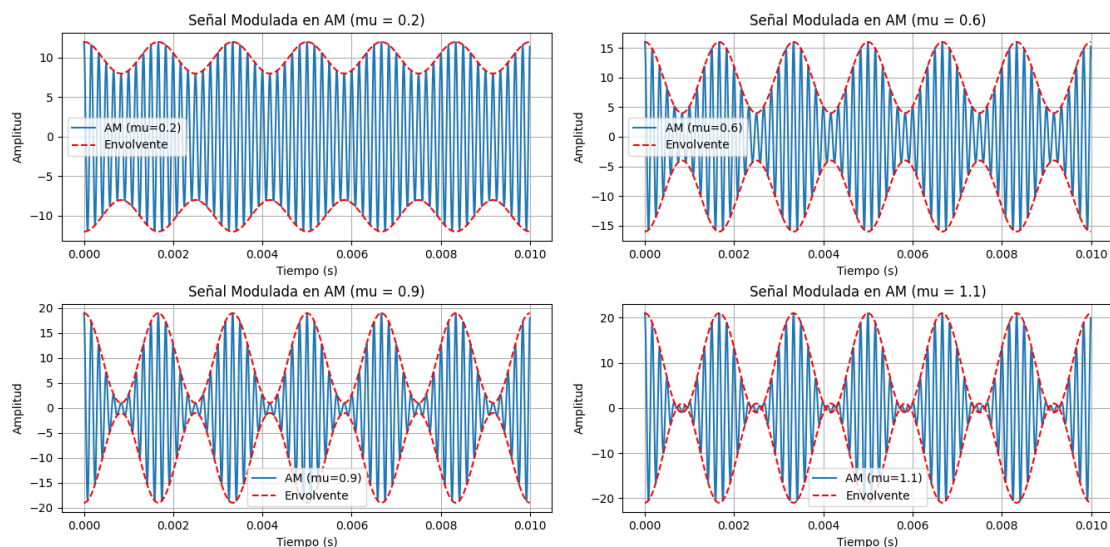


Figura 3: Gráfica de  $s(t)$  para distintas  $\mu$ .

Es posible la detección de envolvente en todos los casos excepto en el porcentaje de 110 % de modulación, ya que cuando la sensibilidad de amplitud  $k_a$  del modulador es lo suficientemente grande como para hacer que  $|k_a m(t)| > 1$  en algún instante de tiempo  $t$ , la onda portadora se convierte en *sobremodulada*, resultando en una inversión de fase de la onda portadora cuando el factor  $(1 + k_a m(t))$  cruza por cero. Entonces, la onda modulada exhibe una *distorsión de envolvente*.

Por lo tanto, para evitar la sobremodulación, se debe mantener una relación uno a uno entre la envolvente de la onda AM y la onda modulante, para todos los valores del tiempo.

### 3. Ejercicio 3

Con los datos del Ejercicio 2, considerar a  $s(t)$  una señal de tensión y conectar a la salida de modulador un resistor de  $50 \Omega$ . Cuando sea posible indicar la respuesta también en dB.

- Calcular la potencia media de la portadora para un  $\mu = 20\%$ .  
**Rta.:** 1 W.
- Calcular la potencia media de la banda lateral inferior y superior para un  $\mu = 20\%$ .  
**Rta.:** 0.01 W.
- Calcular la potencia total de las señales moduladas para un  $\mu = 20\%$ .  
**Rta.:** 1.02 W.
- ¿Cuál es la relación de potencia total de banda lateral respecto la potencia total de señal modulada?  
**Rta.:** 1.96 %.
- ¿Cuál es la relación de potencia total de portadora respecto la potencia total de señal modulada?  
**Rta.:** 98.03 %.
- Repetir nuevamente los cálculos para un  $\mu = 100\%$ .  
**Rtas.:**  $P_c = 1 \text{ W}$ ,  $P_{BLI} = P_{BLS} = 0,25 \text{ W}$ ,  $P_T = 1,5 \text{ W}$ ,  $RP_{BL} \approx 33,3\%$ ,  $RP_c \approx 66,6\%$ .
- Repasar la teoría y analizar los resultados obtenidos en los puntos anteriores.
- Comentar las ventajas y desventajas de este tipo de modulación.

### 4. Ejercicio 4

Considere la misma señal de mensaje y portadora del Ejercicio 2, pero utilice un modulador producto.

- Expresar analíticamente  $s(t)$  y  $S(f)$ . Graficar resultados y explicar cuál fue el cambio en la señal de salida del modulador.
- Considerando que la señal de salida del modulador se aplica a un detector coherente (ver Fig. 2), y que las portadoras tanto en el transmisor como en el receptor se encuentran en perfecto sincronismo: obtener  $v(t)$  y graficar su espectro.
- Ahora suponer que hay una diferencia de fase entre portadoras. Comentar por qué esto es importante y qué sucede en casos extremos.

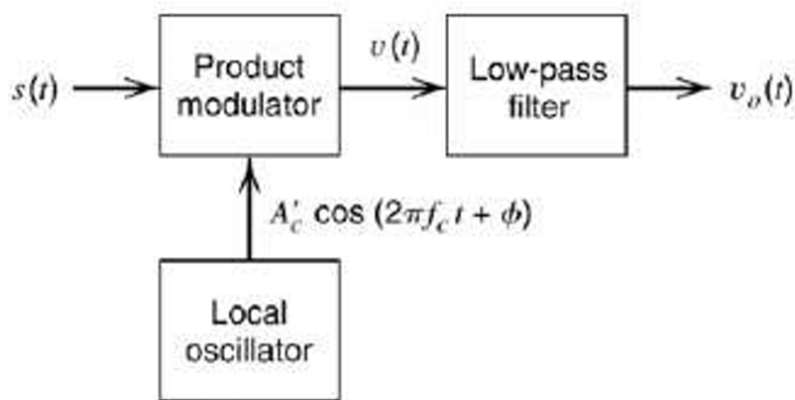


Figura 4: Detector coherente

## 5. Ejercicio 5

Una versión particular de AM estéreo usa multiplexación de portadora en cuadratura. Específicamente, la portadora  $A\cos(2\pi f t)$  es empleada para modular la señal suma:

$$m_s(t) = v + m_l(t) + m_r(t)$$

donde  $v$  es un offset DC incluido con el propósito de transmitir la componente de portadora,  $m_l(t)$  es la señal de audio de canal izquierdo y  $m_r(t)$  es la señal de audio de canal derecho.

La portadora en cuadratura  $A\sin(2\pi f t)$  es empleada para modular la señal diferencia:

$$m_d(t) = m_l(t) - m_r(t)$$

- Mostrar que un detector de envolvente puede ser utilizado para recuperar la suma  $m_l(t) + m_r(t)$  desde la señal multiplexada en cuadratura. ¿Cómo puede minimizar la distorsión de la señal producida por el detector de envolvente?
- Mostrar que un detector coherente puede recuperar la diferencia  $m_l(t) - m_r(t)$ .
- ¿Cómo se obtienen finalmente las señales  $m_l(t)$  y  $m_r(t)$  deseadas?

## 6. Ejercicio 6

Arme el esquema de la Fig. 3 en GNU Radio y realice los siguientes puntos:

- ¿Qué es GNU Radio?
- ¿Qué es una SDR?
- Expresar matemáticamente la señal modulada  $s(t)$  del modulador AM del esquema.
- Explicar brevemente qué realizan cada uno de los bloques de la Fig. 3.
- Obtener las gráficas para un porcentaje de modulación del 10%, 60% y 100%.
- Obtener la gráfica con sobre-modulación en la señal  $s(t)$ .
- Analizar qué sucede con el espectro de la señal en cada uno de los casos planteados en d) y e). Indicar en el informe las gráficas obtenidas.
- Implementar un receptor y obtener la señal original.

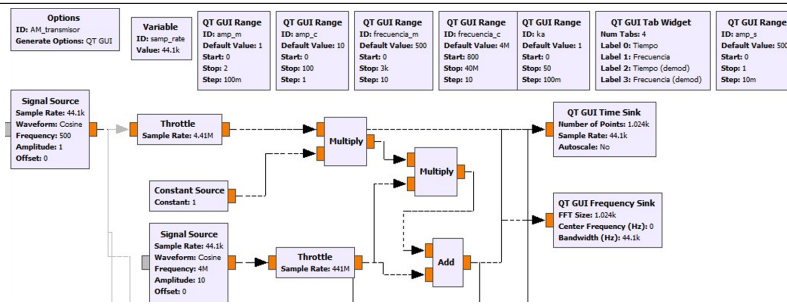


Figura 5: Esquema del modulador AM en GNU Radio

## 7. Ejercicio 7

Diseñar en GNU Radio un modulador que genere una señal de Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida. Indicar cuál es la diferencia de espectro con la señal del ejercicio anterior.