

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

---



## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

---

### Laboratorio de Comunicaciones

(Manual de Prácticas)

---

Práctica 1:

Modulación y demodulación de amplitud

Curso 2007-2008

#### AUTORES:

Fernando Quesada Pereira

Pedro Vera Castejón

Alejandro Alvarez Melcón

## Índice

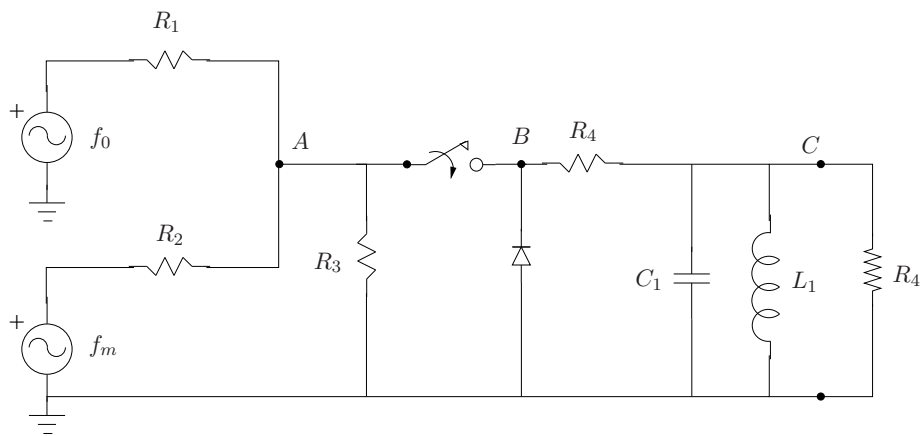
1. Introducción	1
2. Modulador y Demodulador AM	1
3. Supresión de la Portadora	2
4. Modulación de Banda Lateral Única	3
5. Pulsos como Señal Moduladora	3
6. Transformada de Hilbert	4
7. Diseños Prácticos de Moduladores	6

## 1. Introducción

En esta sesión de prácticas vamos a incidir sobre algunos conceptos básicos de la modulación de amplitud (AM). Para ello utilizaremos la herramienta de simulación MATLAB. Con ella estudiaremos los diferentes tipos de señales moduladas AM, incluyendo las modulaciones con portadora suprimida, y las modulaciones de banda lateral única. Finalmente también veremos los diferentes demoduladores que pueden utilizarse, y en qué casos resultan efectivos.

## 2. Modulador y Demodulador AM

El esquema más sencillo de un circuito Modulador simple de Amplitud (AM) puede verse en la Fig. 1.



**Figura 1:** Esquema simple de un modulador AM.

**Ejercicio 1.** Demostrar que la tensión en el punto  $A$  antes de cerrar el interruptor es del tipo:

$$v_A(t) = a \sin(\omega_0 t) + b \sin(\omega_m t) \quad (1)$$

encontrar las constantes  $a$  y  $b$  en el circuito.

**Ejercicio 2.** Suponiendo una portadora de frecuencia  $f_0 = 100\text{KHz}$ , y una señal moduladora sinusoidal de frecuencia  $f_m = 5\text{KHz}$ , visualizar la señal  $v_A(t)$  en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Tomar  $a = 1$ ,  $b = 0,2$ . ¿Qué cree que va a controlar la relación entre  $a$  y  $b$  en la modulación?. Representar la señal en un dibujo o gráfica.

Al cerrar el interruptor, la señal del punto  $A$  pasa a un diodo de ley cuadrática. Podemos suponer que la señal a la salida del diodo es:

$$v_B(t) = a_0 + a_1 v_A(t) + a_2 v_A^2(t) \quad (2)$$

**Ejercicio 3.** Tomando  $a_0 = 0,1$ ,  $a_1 = 1$  y  $a_2 = 1$  visualizar y dibujar la señal  $v_B(t)$  tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia. ¿Qué parámetro va a controlar también la relación entre  $a_1$  y  $a_2$ ?. Comente los resultados obtenidos.

Como habrá visto, el espectro de la señal resultante contiene la información de la modulación AM, más otros armónicos a diferentes frecuencias. Para obtener una señal modulada AM es necesario eliminar los armónicos. Para esto se pone el filtro constituido por  $C_1$  y  $L_1$ .

**Ejercicio 4.** Obtener la señal a la salida del modulador  $v_C(t)$  filtrando la señal  $v_B(t)$ . Visualizar y representar la señal resultante tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia. Medir el índice de modulación tanto en el tiempo como en la frecuencia.

**Ejercicio 5.** Detectar la señal utilizando un detector de envolvente, es decir, con un diodo y un filtro paso bajo (puede suponer que el diodo tiene una respuesta cuadrática igual al diodo utilizado en el transmisor). Visualizar y representar la señal en el tiempo y en la frecuencia, antes y después del filtrado. ¿Ha detectado correctamente la señal moduladora?.

**Ejercicio 6.** Repetir el ejercicio anterior tomando las constantes  $a = 1$  y  $b = 0,8$ . Cuanto vale ahora el índice de modulación. Visualizar, representar, y comentar los resultados obtenidos en las distintas etapas de la cadena. ¿Ha detectado correctamente la señal moduladora?.

Debido a la sobre-modulación, se comete un error importante al utilizar un detector de envolvente. Sin embargo, la señal se puede recuperar sin error si utilizamos un detector coherente.

**Ejercicio 7.** Realizar la detección mediante un detector coherente. Representar la señal detectada en tiempo y frecuencia. ¿Ha conseguido recuperar la señal moduladora correctamente?.

### 3. Supresión de la Portadora

El siguiente sistema modulador que tiene interés en comunicaciones es la modulación AM con doble banda lateral y portadora suprimida. La ventaja de este sistema es que transmitimos toda la información en las bandas laterales sin gastar potencia en la transmisión de la portadora.

Para realizar una modulación de este tipo, podemos utilizar el esquema del modulador de la Fig. 1, pero en lugar de utilizar un diodo cuadrático como elemento no lineal, deberemos utilizar un modulador balanceado que sea capaz de sustraer la portadora. Para nuestra simulación, nosotros podemos suponer que el modulador produce una tensión en el punto  $B$  de la siguiente forma (comportamiento parabólico):

$$v_B(t) = a_2 v_A^2(t) \quad (3)$$

**Ejercicio 8.** Utilizando este nuevo modulador balanceado representar en el tiempo y en la frecuencia las señales en los puntos  $A$  y  $B$ .

**Ejercicio 9.** Obtener finalmente la señal en el punto  $C$  del circuito, después de realizar el filtrado con  $C_1$  y  $L_1$ . Visualizar la señal en el tiempo y en la frecuencia. Describir la forma de onda que tiene una modulación doble banda lateral con portadora suprimida.

Un detector de envolvente no puede utilizarse para detectar la señal modulada con portadora suprimida. La detección de este tipo de señales se complica, ya que deberemos utilizar un detector coherente.

**Ejercicio 10.** Realizar un detector coherente. Representar en el tiempo y en la frecuencia la señal a la salida del mezclador coherente.

**Ejercicio 11.** Realizar el filtrado paso bajo, y representar en el tiempo y en la frecuencia la señal moduladora detectada. Medir el periodo y la frecuencia del tono detectado. ¿Se ha detectado correctamente la señal moduladora?. ¿Que diferencias hay entre la señal detectada con modulación sin portadora y la señal detectada con modulación con portadora?.

## 4. Modulación de Banda Lateral Única

En las modulaciones anteriores la información va en las dos bandas laterales. Podemos ahorrar potencia en la transmisión si solo transmitimos una de las dos bandas laterales. La forma más sencilla de realizar una modulación en banda lateral única es tomando la señal producida por el modulador con portadora suprimida, para a continuación filtrar una de las bandas laterales.

**Ejercicio 12.** Tomando la señal en el punto  $C$  del circuito con modulador balanceado, construir un filtro paso banda que elimine la banda lateral inferior de la señal. Representar la señal resultante tanto en tiempo como en frecuencia. ¿Qué aspecto tiene la señal en el tiempo?. Si la señal producida es una simple señal sinusoidal, ¿donde cree que está la información?.

Sabemos que no es posible detectar esta señal con un detector de envolvente. Vamos a realizar, pues, una detección coherente.

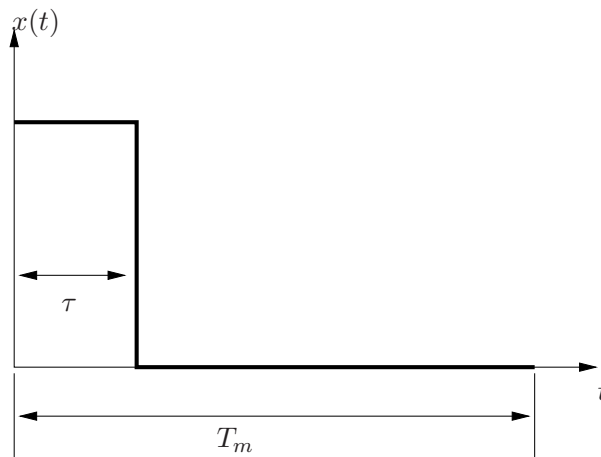
**Ejercicio 13.** Representar en el tiempo y en la frecuencia la señal a la salida del mezclador coherente.

**Ejercicio 14.** Realizar el filtrado paso bajo, y representar en el tiempo y en la frecuencia la señal moduladora detectada. ¿Se ha detectado correctamente la señal?. ¿Existe alguna diferencia entre esta señal y la detectada en una modulación doble banda lateral con portadora suprimida?.

## 5. Pulsos como Señal Moduladora

Con el fin de visualizar el aspecto de las señales moduladas por amplitud cuando la señal moduladora no es un simple tono, sino que tiene una banda base más o menos complicada, vamos a repetir el proceso de modulación AM con un tren de pulsos digital.

Para este ejercicio vamos a tomar una frecuencia de portadora de  $f_0 = 200\text{KHz}$ . Tomaremos una frecuencia de la señal moduladora correspondiente a la Fig. 2 de  $f_m = 1/T_m = 5\text{KHz}$ . Finalmente, fijaremos la anchura del pulso mostrado en la Fig. 2 a:  $\tau = T_m/8\text{seg}$ . Para obtener en MATLAB esta señal, fijar una frecuencia de muestreo  $f_s = 5f_0$ . En primer lugar vamos a generar un pulso como el mostrado en la Fig. 2. Para ello tomaremos como número de muestras:  $N = \text{ceil}(f_s * T_m)$ , y como eje de tiempos:  $t1 = \text{linspace}(0, T_m, N)$ . La creación del pulso se realiza mediante el comando MATLAB:  $yp = \text{rectpuls}(t1, 2 * \tau)$ . Finalmente, podemos obtener un tren de pulsos repitiendo el pulso anterior un número de veces:  $N_{\text{puls}} = 10$ . La repetición puede hacerse fácilmente en MATLAB con el comando:  $\text{trenpuls} = \text{repmat}(yp, 1, N_{\text{puls}})$ .



**Figura 2:** Nueva señal moduladora en un periodo.

Como se sabe, el espectro de la señal moduladora tiene forma de sinc infinita. Con el fin de trabajar con una señal limitada en banda vamos a filtrar la señal paso bajo.

**Ejercicio 15.** Filtrar la señal moduladora con un filtro FIR paso bajo de orden 100. Fijar la banda pasante del filtro en  $BW = 2/\tau$ . Dibujar la señal resultante en tiempo y frecuencia. ¿Cuántos lóbulos de la sinc del espectro han pasado?. ¿Cual es el efecto del filtrado en la señal pulsada en el tiempo?.

Utilizaremos esta señal moduladora en el modulador de AM mostrado en la Fig. 1. Para realizar la suma de las señales tomar los coeficientes  $a = 1$ , y  $b = 2,0$ .

**Ejercicio 16.** Obtener la señal en el punto B del modulador, utilizando el conocido diodo descrito en la ecuación (2). Representar la señal obtenida en tiempo y frecuencia.

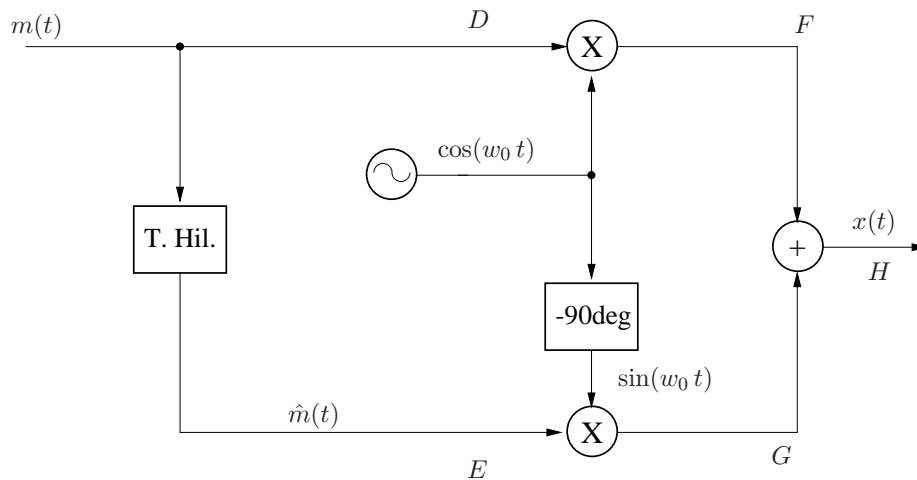
**Ejercicio 17.** Realizar el filtrado para limpiar el espectro de la señal AM. Representar la señal obtenida en tiempo y frecuencia. ¿Ha obtenido una réplica del espectro de la señal moduladora (sin distorsión) pero trasladado a frecuencias altas?.

**Ejercicio 18.** Realizar la detección por envolvente (diodo mas filtro paso bajo). Representar en tiempo y frecuencia la señal demodulada. ¿Ha conseguido recuperar la información original?.

## 6. Transformada de Hilbert

Existe otro método para generar modulaciones AM de banda lateral única, que elimina la necesidad de filtros muy selectivos. En este caso la señal se procesa en banda base con la Transformada de Hilbert, para producir directamente la señal de banda lateral única en Radiofrecuencia. El diagrama de bloques de un modulador en banda lateral única empleando la Transformada de Hilbert se presenta en la Fig. 3.

Como vemos en la figura, tenemos que hacer la Transformada de Hilbert de la señal moduladora. Una forma sencilla de hacer esto es trabajando en el dominio de la frecuencia, puesto que el espectro de



**Figura 3:** Modulador en banda lateral único usando la Transformada de Hilbert.

la Transformada de Hilbert está relacionado con el espectro de la señal original por la sencilla relación:

$$\hat{M}(\omega) = -j M(\omega) \operatorname{sgn}(\omega) \quad (4)$$

Por tanto vamos a tomar en primer lugar la FFT de la señal moduladora. Transformaremos el espectro según (4), y posteriormente haremos una transformada inversa de Fourier para obtener la transformada de Hilbert en el dominio temporal. Para realizar los siguientes experimentos tomar como señal moduladora el tren de pulsos de la Fig. 2.

**Ejercicio 19.** Utilizando el procedimiento descrito, representar en el dominio del tiempo y de la frecuencia las señales en los puntos  $D$  y  $E$ . ¿Qué diferencias se observan entre las dos señales tanto en tiempo como en frecuencia?.

**Ejercicio 20.** Obtener finalmente la señal en el punto  $H$  (salida del modulador). Representar en tiempo y en frecuencia la señal. Indicar si ha obtenido correctamente una modulación AM en banda lateral única.

Podemos comprobar qué le ocurre a la señal si existe un error de fase entre los canales fase-cuadratura de la Fig. 3.

**Ejercicio 21.** Cambiar el desfasador de  $90^\circ$  de la Fig. 3 por otro de  $\pi/3$ . Visualizar en tiempo y frecuencia la señal obtenida. ¿Cómo afecta el error de fase en la señal generada?. Si el error de fase es  $\pi$ , ¿qué señal obtiene a la salida del modulador?.

Vuelva al modulador ideal sin error de fase entre los canales fase-cuadratura de la Fig. 3. En este caso podemos recuperar la información utilizando un detector coherente.

**Ejercicio 22.** Suponer que en el detector coherente hay un error de fase de  $\varphi = \pi/2$ . Dibujar las señales obtenidas en tiempo y frecuencia, antes y después del filtrado final paso bajo. ¿Qué señal ha recuperado a la salida del demodulador coherente?.

## 7. Diseños Prácticos de Moduladores

En esta parte de la práctica vamos a utilizar el programa PSPICE para comprobar el comportamiento real de dos moduladores de amplitud. El primer circuito que vamos a investigar es el modulador simple presentado en la Fig. 1. Vamos a montar en PSPICE el circuito de la Fig. 1. Tomar todas las resistencias de valor ( $R_1 = R_2 = R_3 = 1\text{K}\Omega$ ), y los dos generadores con amplitud 30V.

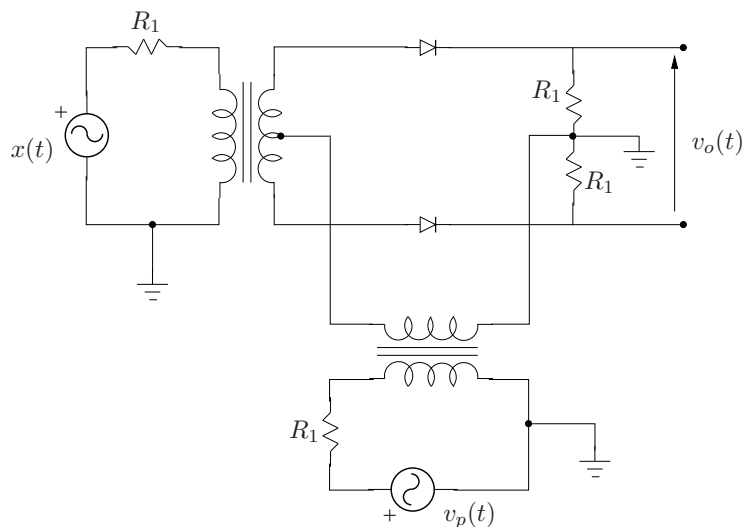
**Ejercicio 23.** Montar el circuito completo (el interruptor lo puede omitir), pero sin el filtro de salida (tomar  $R_4 = 100\text{K}\Omega$ ). Para el diodo tomar el modelo de PSPICE llamado: D1N914. Dibujar la señal obtenida a la salida, tanto en tiempo como en frecuencia. ¿Obtiene el resultado previsto?.

**Ejercicio 24.** Añadir el filtro a la salida. Tomando  $C_1 = 120\text{pF}$ , diseñar el grupo  $LC$  para filtrar la frecuencia de 100KHz. Dibujar la señal de salida tanto en tiempo como en frecuencia, e indique el valor de la inductancia  $L$  que ha utilizado. ¿Obtiene el resultado esperado?.

**Ejercicio 25.** ¿Qué parámetro controla la resistencia  $R_4$ ? Repetir la simulación tomando  $R_4 = 10\text{K}\Omega$ . Dibujar la señal a la salida tanto en tiempo como en frecuencia. Interpretar los resultados.

**Ejercicio 26.** Con  $R_2 = 2,5\text{K}\Omega$ , añadir un detector de envolvente a la salida del modulador, con el fin de recuperar la señal moduladora. Para el detector de envolvente usar un diodo del tipo D1N914, y una resistencia de  $100\text{K}\Omega$ . Ajustar el valor del condensador para que el rizado sea el menor posible. Indicar el valor del condensador tomado y dibujar la señal de salida, tanto en tiempo como en frecuencia. ¿Ha recuperado correctamente la señal moduladora?.

El segundo circuito que vamos a investigar es un modulador en Doble Banda Lateral (DBL). La forma más inmediata de implementar una modulación en Doble Banda Lateral (DBL) sin portadora, es realizando el proceso de suma de señales, para después introducir la señal suma en un modulador balanceado. El esquema del circuito se muestra en la Fig. 4. En el esquema mostrado, el componente



**Figura 4:** Modulador balanceado.

más nuevo es el transformador de Radiofrecuencia. Este componente está caracterizado por las induc-



tancias del primario ( $L_1$ ) y del secundario ( $L_2$ ), así como por el coeficiente de acoplo ( $K$ ). Una vez estos parámetros especificados, la llamada inductancia mutua entre primario y secundario ( $M$ ) puede ser calculada fácilmente:

$$M = K \sqrt{L_1 L_2} \quad (5)$$

Esta inductancia mutua fija la tensión inducida en el secundario ( $V_2$ ) cuando circula una corriente por el primario ( $I_1$ ) (y viceversa):

$$V_2 = j \omega M I_1; \quad V_1 = j \omega M I_2; \quad (6)$$

Finalmente indicamos que el signo del coeficiente de acoplamiento indica el signo de la tensión inducida con respecto del signo de la corriente que circula por el bobinado contrario.

**Ejercicio 27.** Simular el modulador balanceado utilizando el programa SPICE. Realizar la simulación del circuito en el dominio del tiempo. Utilizar una frecuencia de portadora  $f_p = 100\text{KHz}$ , y como señal moduladora un tono de baja frecuencia  $f_m = 5\text{KHz}$ . El transformador con toma intermedia puede realizarse mediante dos transformadores simples, cuyo componente en SPICE recibe el nombre: XFRM\_LINEAR/ANALOG. Para los diodos tomar el modelo D1N914. Realizar el diseño del modulador balanceado indicando los valores de todos los componentes del circuito. Dibujar la señal modulada obtenida en el tiempo. Realizar la FFT y dibujar el espectro obtenido. ¿Ha conseguido eliminar la portadora?

**Ejercicio 28.** Diseñar un filtro  $LC$  simple para eliminar los armónicos no deseados (tomar  $C = 120\text{pF}$ ). Dibujar el esquema del filtro diseñado, e indicar el valor de todos los componentes del filtro. Acoplar el filtro al modulador y representar en tiempo y en frecuencia la señal obtenida a su salida. ¿Ha conseguido una buena modulación en DBL?

**Ejercicio 29.** ¿Qué señal obtiene a la salida si cambia el signo del acoplo mutuo a una de las mitades del bobinado del transformador de la señal moduladora?

**Ejercicio 30.** ¿Cómo podría realizar un modulador AM con una sola modificación del circuito anterior?. Introducir la modificación para obtener una señal de salida AM. Representar la señal de salida en tiempo y frecuencia e indicar el valor del componente que ha modificado.