

Conversión y tratamiento de señales: modulaciones analógicas y digitales

2



Las señales que obtenemos de un transductor hay veces que no podemos hacer uso de ellas para transmitir tal cual, sino que las hemos de tratar. En muchos casos, hemos de aplicar a la señal un proceso de transformaciones para pasar la información de su forma original a una forma más adecuada para la transmisión. Hemos de aplicar a la señal un proceso llamado modulación.

Aunque en los sistemas de radiocomunicaciones se pueden establecer transformaciones para su transmisión tanto de señales analógicas como de digitales, estas últimas se pueden someter a una mayor diversidad de transformaciones que hacen más eficiente su transmisión y permiten un menor deterioro de la información original que contienen, por lo que cada vez es más frecuente la conversión de información en forma originalmente analógica a digital.

Esta unidad se limita a la descripción general y concisa de las conversiones y tratamiento de las señales que son más usuales en las radiocomunicaciones, que fundamentalmente, pero no solo, caracterizan a los sistemas de transmisión para radio y televisión.

Contenidos

- 2.1. Transmisión de señales: modulación
- 2.2. Modulación en amplitud
- 2.3. Modulación angular PM y FM
- 2.4. Modulaciones digitales

Objetivos

- Caracterizar la modulación en los sistemas de transmisión para radio y televisión.
- Afianzar el concepto de modulación.
- Familiarizarse con las principales modulaciones analógicas.
- Dominar las principales modulaciones digitales.

2.1. Transmisión de señales: modulación

Para realizar la transmisión vía radio se debe emplear una frecuencia muy alta en comparación a la voz del ser humano. A esto se lo llama **modulación** y es el proceso que consiste en elevar la frecuencia de la señal que se desea enviar hasta una frecuencia superior de manera que se transmita de forma correcta por el medio.

Recuerda que...

El proceso de modulación consiste en variar las propiedades de la señal llamada portadora (señal que transporta el mensaje hasta el receptor) mediante una señal que se llama moduladora (señal que contiene el mensaje que se va a transmitir). La modulación puede variar los siguientes parámetros:

- Amplitud.
- Frecuencia.
- Fase.

En una visión general, las modulaciones pueden clasificarse por el tipo de portadora y de información que esta transporta, tal y como vemos en la Figura 2.1.

Es importante tener en cuenta que las transmisiones por ondas de radiofrecuencia solo permiten la propagación con

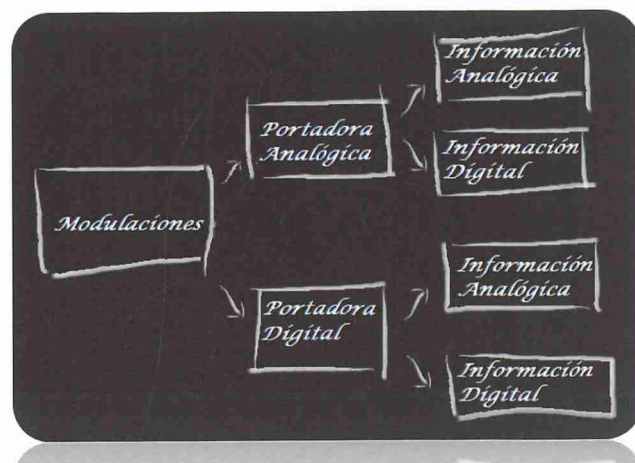


Figura 2.1. Clasificación de las modulaciones.

las portadoras analógicas, ya que las portadoras sinusoidales carecen de armónicas, por lo que producen menos productos de modulación.

Las modulaciones con portadoras digitales e información analógica se utilizan en el procesamiento de señales, por ejemplo, fuentes de alimentación conmutadas, UPS, adquisición de datos analógicos, etc.

El último grupo, portadora e información digital, se utilizan en codificación digital.

En la Figura 2.2 se resumen los tipos de modulación más importantes, clasificados según la portadora o la modulante sea analógica o digital.

Información portadora	Análogica	AM	DBL	DBL	Doble banda lateral
			BLU	BLS	Banda lateral superior
			BLV	BLU	Banda lateral única
			QAM	BLI	Amplitud modulada
				BLV	Banda lateral inferior
		FM		QAM	Banda lateral vestigial
		PM		FM	Modulación en cuadratura
				PM	Frecuencia modulada
				ASK	Fase modulada
Información portadora	Digital		m - QAM	ASK	Mod. digital por cambio amp.
	Análogica	PSK	BPSK	m - QAM	Mod. dig. multinivel en cuadra.
			m - PSK	BPSK	Mod. binaria cambio fase
				PSK	Mod. dig. cambio de fase
				m - PSK	M. cam. fase saltos discretos
				FSK	M. d. cambio de frecuencia
Información portadora	Análogica	FSK		PAM	Mod. por amplitud de pulso
	Digital	PAM		PWM	Mod. por ancho de pulso
		PWM		PPM	Mod. por posición de pulsos
		PPM		PCM	Mod. de pulsos codificados
Información portadora	Digital	PCM		DPCM	Mod. de pul. cod. diferenciales
	Digital	DPCM		ADPCM	Mod. de p. cod. dife. adaptativa
		ADPCM			

Figura 2.2. Métodos de modulación.

2.1.1. Sistemas de transmisión

Estos sistemas están formados por un transmisor, un canal de transmisión y un receptor. En la Figura 2.3 se observa un esquema simplificado de un sistema de radiocomunicaciones analógico que ayudará a ilustrar el proceso que recorre la señal.

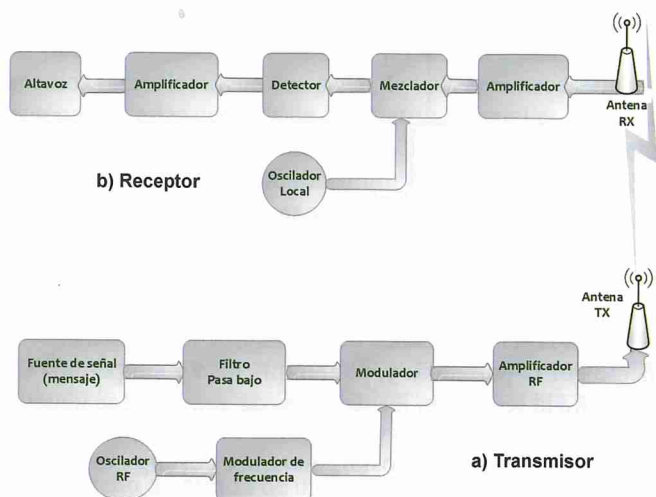


Figura 2.3. Esquema de un transmisor y receptor de señales. a) Transmisor. b) Receptor.

En la **transmisión**, el mensaje se amplifica y por lo general se pasa por un filtro paso bajo que limita el ancho de banda de la señal de entrada. El oscilador de radiofrecuencia (RF) genera la frecuencia de la señal portadora. Este oscilador tiene que ser muy preciso y por lo general se fabrica con un cristal de cuarzo. De allí las dos señales anteriores pasan por un modulador que se encarga de realizar la modulación de la señal portadora. Una vez modulada la señal portadora hay que amplificarla para aumentar el nivel de potencia de la señal y así poder transmitirla por el **canal de transmisión**. Finalmente, la antena de transmisión convierte la señal de RF en una onda electromagnética.

En la **recepción**, los bloques encargados de esta tarea se pueden resumir de la siguiente forma: la antena de recepción, que puede ser omnidireccional para cuando el servicio de recepción es de carácter general o altamente direccional para cuando el servicio es punto a punto. De aquí, una vez que la onda electromagnética emitida por el transmisor llega a la antena del receptor induce sobre ella una tensión eléctrica proporcional a la señal de transmisión. Entonces, la etapa de amplificación se ocupa de aumentar la potencia de la señal recibida para que pueda excitar el mezclador, el mismo que recibe además una señal del oscilador local (OL) de frecuencia constante para poder demodular la señal. El detector es entonces el encargado de recuperar la señal original, para que una vez extraída la señal de la portadora haya que

amplificarla otra vez porque el nivel de señal sigue siendo muy bajo. Finalmente, el dispositivo de salida puede ser un altavoz si las señales son de radio o un televisor si las señales que se transmiten son imágenes de televisión.

2.1.2. Modulaciones analógicas

En los sistemas analógicos de comunicaciones, la única forma posible de separar señales distintas que ocupan el mismo espectro en banda base (sonido, imagen, etc.), para su transmisión por el mismo medio de transporte, ya sea este una línea telefónica, un cable o el aire, es trasladándolas en el espectro de frecuencia, de modo que cada señal individual ocupe una «ranura» específica en el espectro. El receptor deberá tener, a su vez, capacidad para seleccionar cada una de esas ranuras y recuperar las señales individuales sin interferencia de las demás.

El proceso mediante el cual se traslada una señal en banda base en el espectro de frecuencia es la **modulación** y a la señal así trasladada se designa como **señal modulada**. Una forma simple de analizar este proceso es suponer una señal en banda base constituida por un tono sinusoidal de frecuencia única:

$$f_m \rightarrow x(t) = A \cdot \cos(\omega_m t)$$

Donde $\omega_m = 2\pi f_m$ es la **frecuencia angular** en radianes por segundo. A $x(t)$ se le designa como **señal moduladora**.

Supóngase ahora que se tiene otra señal sinusoidal, de frecuencia f_c , mucho mayor que f_m y a la que designaremos como **portadora**:

$$y(t) = B \cdot \cos(\omega_c t)$$

Donde $\omega_c = 2\pi f_c$

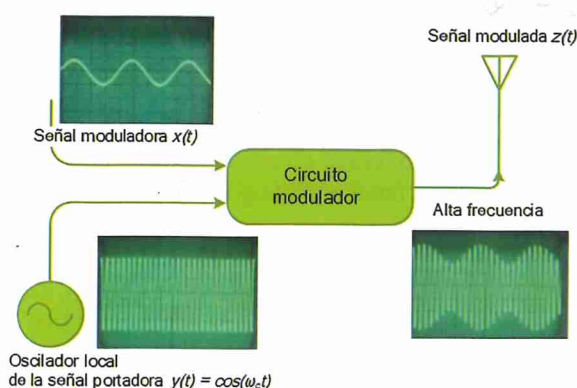


Figura 2.4. Modulación.

El espectro de estas señales está representado por dos líneas a las frecuencias f_m y f_c , ya que se trata de señales si-

senoidales puras con una sola componente espectral, como se muestra en la Figura 2.5.

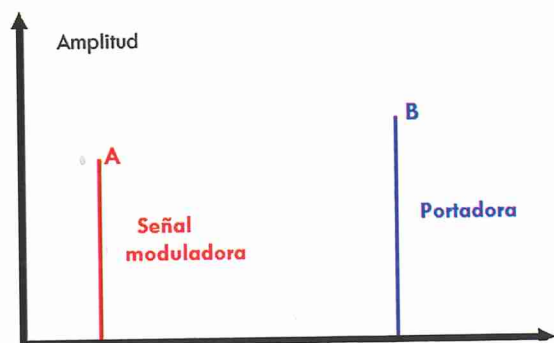


Figura 2.5. Espectro de las señales moduladora y portadora asumiéndolas como senoidales puras.

Si las señales anteriores se multiplican mediante algún dispositivo (que no se analizará de momento), se tiene una nueva señal:

$$z(t) = \frac{AB}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t]$$

La señal anterior tiene dos componentes espectrales, una de frecuencia $f_c + f_m$ y otra de $f_c - f_m$. Las señales originales f_c y f_m han desaparecido en este proceso de multiplicación y el espectro resultante tiene la forma ilustrada en la Figura 2.6. La señal moduladora se ha «desdoblado» en dos componentes alrededor de la frecuencia correspondiente a la portadora. Estas dos componentes tienen la información de amplitud y frecuencia de la señal en banda base original.

De hecho, mediante el proceso de modulación, lo que se ha hecho es variar los parámetros (amplitud y frecuencia) de la portadora, de acuerdo a la amplitud y frecuencia de la señal moduladora. La nueva frecuencia a la que se ha trasladado la señal moduladora está determinada por el valor de la frecuencia de la portadora y a la señal modulada también se le designa como **señal en banda de paso**.

El proceso inverso de la modulación es la **demodulación** o **detección** y, para el caso del ejemplo, una forma de con-

seguirlo es multiplicando la señal modulada por una señal sinusoidal, generada localmente en el receptor, de la misma frecuencia y fase que la portadora. Este tipo de demodulación se designa como **demodulación síncrona** o **coherente** y se ilustra en la Figura 2.7.

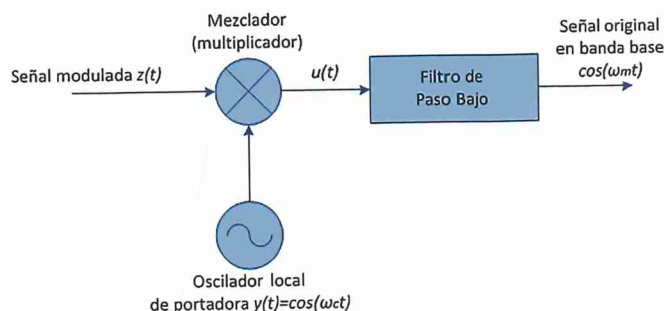


Figura 2.7. Demodulador síncrono.

Así, si la señal en banda de paso $z(t)$ se multiplica nuevamente por la portadora y, por simplicidad y sin pérdida de generalidad se omiten los términos de amplitud, se tiene:

$$\begin{aligned} u(t) &= y(t) \cdot z(t) = [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t] \cdot \\ &\cdot \cos \omega_c t = 2\cos^2(\omega_c t) \cdot \cos(\omega_m t) = \cos(\omega_m t) + \\ &+ \cos(2\omega_c t) \cdot \cos(\omega_m t) \end{aligned}$$

La señal anterior contiene dos términos; el primero corresponde a la señal original en banda base y el segundo corresponde a la señal modulada, ahora alrededor de una portadora del doble de frecuencia de la original ($2f_c$). Si a la salida del multiplicador se coloca un filtro de paso bajo, esta componente quedará eliminada y se obtendrá a la salida la señal original deseada.

Basándonos en el mismo ejemplo anterior, es evidente que si se tienen varias señales de información en la misma banda base, estas pueden trasladarse a diferentes posiciones en el espectro, si con ellas se modula a portadoras de frecuencias diferentes. Supóngase que se tienen tres señales de voz, cada una de las cuales ocupa un espectro de 300 a 3400 Hz y que se tienen tres portadoras, una de 100 kHz, otra de 200 kHz y otra de 300 kHz. Es claro que las

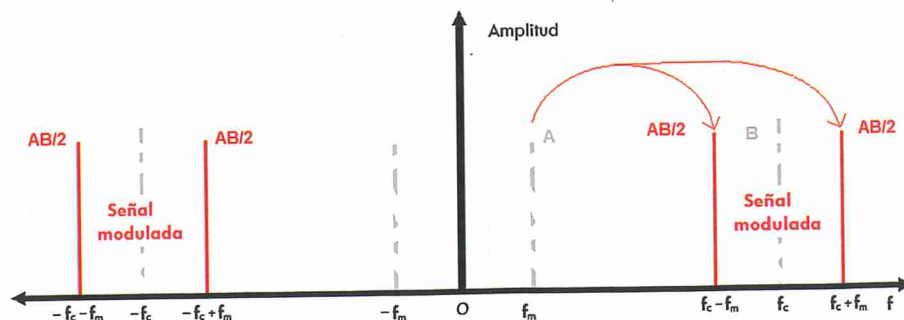


Figura 2.6. Espectro de la señal modulada.

tres señales pueden transmitirse por radio o por cable sin interferirse. Este proceso de combinar varias señales para transmitir las por un mismo medio se designa como **multiplexado** o **multicanalización en frecuencia**.

Ahora bien, el multiplexado no es la única razón para la modulación. En los sistemas radioeléctricos de comunicaciones se utilizan antenas, tanto para transmitir como para recibir las señales. Estas antenas, para que funcionen de manera eficiente, deben ser de dimensiones del orden de media longitud de onda. Si se pretendiera transmitir por medios radioeléctricos una señal de voz, será necesaria una antena de varias decenas de kilómetros, lo cual es impensable. Si esa señal de voz modula a una portadora, por ejemplo de 10 MHz, se puede transmitir con una antena de poco más de diez metros que es ya fácilmente realizable.

De forma similar al traslado en frecuencia de una señal en banda base, es igualmente posible trasladar señales moduladas a porciones diferentes del espectro. Este proceso recibe el nombre de **conversión** y puede ser **ascendente** cuando la señal trasladada es de frecuencia superior a la de la original, o **descendente** cuando es de frecuencia inferior.

El **ancho de banda** de una señal es la porción del espectro en que está contenida su energía. En algunos casos no es necesario transmitir todo el espectro de las señales; por ejemplo, la voz humana tiene componentes que pueden alcanzar hasta unos 10 kHz, sin embargo la energía contenida a estas frecuencias es muy pequeña y, en la práctica, es suficiente transmitir solamente hasta unos 3,5 o 4 kHz. Algo similar ocurre en bajas frecuencias y solamente se transmiten las frecuencias superiores a unos 300 Hz. Las señales de vídeo tienen componentes frecuenciales significativas hasta alrededor de 5 MHz. Las señales telegráficas, por el contrario, tienen anchos de banda muy reducidos, del orden 100 Hz o menos. Estos anchos de banda son en paso bajo o banda base. El ancho de banda de las señales moduladas o **ancho de banda del canal**, depende tanto del ancho de banda base como del tipo de modulación empleado y, en general, es superior al ancho de banda base. Por ejemplo, en radiodifusión sonora en ondas medias, el ancho de banda del canal es de 9 kHz, en televisión terrestre, es de 6 a 8 MHz, dependiendo del estándar utilizado, en televisión por satélite, en que la señal va modulada en frecuencia (FM), el

ancho de banda del canal puede ser de 24 a 36 MHz, y en radiodifusión sonora en FM, es de 100 kHz.

Actividades propuestas

- 2.1. ¿Qué es la modulación? ¿Por qué es necesaria para transmitir señales vía radio?
- 2.2. ¿Qué señal contiene la información que se quiere transmitir, la portadora o la moduladora?
- 2.3. ¿Qué aporta la señal portadora al proceso de modulación?
- 2.4. ¿Qué ventajas proporciona la modulación al proceso de radiocomunicación?
- 2.5. ¿Cuáles son los parámetros de la señal portadora que se pueden variar durante el proceso de modulación?
- 2.6. ¿En qué grandes grupos podemos clasificar las diferentes modulaciones que existen?
- 2.7. ¿Qué grupos de modulaciones son las que se pueden transmitir por ondas de radiofrecuencia?

2.2. Modulación de amplitud

En este tipo de modulación, la amplitud de la portadora varía según la señal de información, de modo que la información de amplitud y frecuencia de esta se «montan» sobre la portadora haciendo que su envolvente varíe de acuerdo a la señal moduladora o de información. Los diversos esquemas de modulación de amplitud se designan también como de **envolvente variable** y comprenden los siguientes:

- AM con portadora completa y dos bandas laterales o AM completa o Double Side Band Full Carrier (AM DSBFC).
- AM con dos bandas laterales y portadora suprimida o Double Side Band Suppressed Carrier (DSB-SC).
- Banda lateral única (BLU o Single Side Band, SSB) sin portadora o (SSB-AM-SC).
- Banda lateral única con piloto de portadora.
- AM con vestigio de banda lateral o AM con banda lateral vestigial (Vestigial Side Band AMVSB).

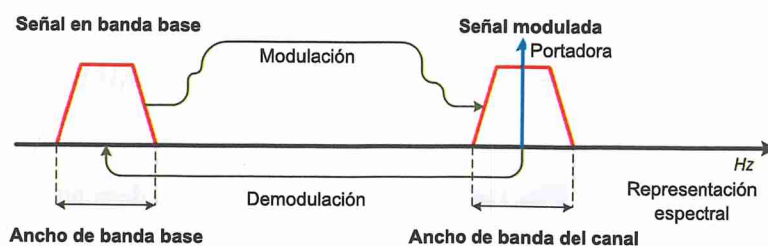


Figura 2.8. Ancho de banda en modulación y demodulación.

2.2.1. AM con doble banda lateral y portadora completa (AM completa)

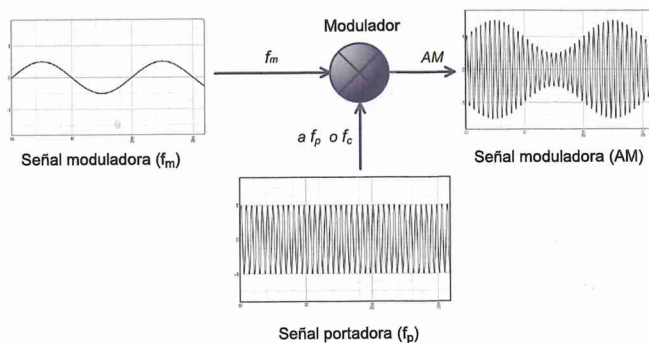


Figura 2.9. Bloque básico de un modulador en amplitud de mensaje sinusoidal f_m .

Sabías que...

La AM fue el primer método de modulación utilizado en los inicios de la radio, a principios del siglo XX y continúa utilizándose extensamente en todo el mundo, principalmente para servicios de radiodifusión sonora en las bandas de ondas medias (535 a 1605 kHz) y de ondas cortas (2 a 30 MHz). Una razón para seguir empleándolo es la simplicidad del receptor, lo que permite la fabricación de receptores sencillos y de bajo coste, al alcance de las personas de pocos recursos.



Figura 2.10. Radio Iberia, modelo 4427 Campeador, del año 1956. (Cortesía del Museo de la Radio Ponferrada.)

La señal de amplitud modulada completa suele expresarse en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} z(t) &= v_{AM}(t) = (1 + mx_m(t))x_c(t) = \\ &= A_c (1 + mx_m(t)) \cos(\omega_c t) = \\ &= V_c [1 + m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_c t) = \\ &= V_c \cos(\omega_c t) + \frac{mV_c}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t] \end{aligned}$$

Donde $x_c(t) = A_c \cos \omega_c t$ es la portadora y V_c representa el voltaje de pico de la portadora y m designado como índice de modulación.

El **índice de modulación** es la relación entre la amplitud de la señal moduladora y la amplitud de la señal portadora, y se define a continuación como:

$$M = \frac{\text{Amplitud}_{\text{moduladora}}}{\text{Amplitud}_{\text{portadora}}} \cdot 100$$

O bien,

$$m = V_m/V_c$$

Donde V_m es el voltaje de pico de la señal moduladora. El índice de modulación, m , puede tomar valores entre 0 y 1. El primero corresponde a la ausencia de modulación, en tanto que $m = 1$ corresponde al máximo nivel (100 %) permisible de modulación.

En la Figura 2.11 se aprecian con mejor detalle los parámetros de la señal modulada en amplitud, cuyo valor instantáneo es $\pm V_c (1 + m \cos \omega_m t)$.

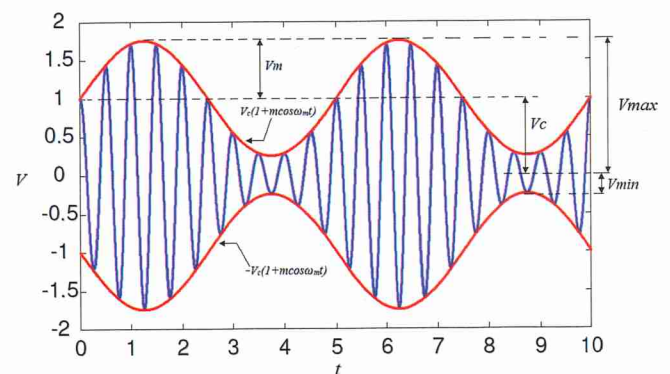


Figura 2.11. Parámetros en la señal modulada.

El voltaje máximo, instantáneo, de la señal modulada es $V_{max} = V_c (1 + m)$ y el mínimo, $V_{min} = V_c (1 - m)$. La señal mostrada en la Figura 2.11 puede verse fácilmente en un osciloscopio, con lo que los voltajes máximo y mínimo pueden medirse y determinar, así, el índice de modulación como:

$$\begin{aligned} M &= \frac{V_m}{V_c} \cdot 100 = \frac{1/2 (V_{max} - V_{min})}{1/2 (V_{max} + V_{min})} \cdot 100 = \\ &= \frac{(V_{max} - V_{min})}{(V_{max} + V_{min})} \cdot 100 \end{aligned}$$

El valor máximo de m no debe exceder de 1, y es deseable mantener el **porcentaje de modulación** M alto en torno al 95-99 %. Si $m > 1$, se tiene sobremodulación, y como se ilustra en las Figuras 2.13 y 2.14 se producirá en la parte

negativa de la señal moduladora un corte de la portadora y la envolvente de la señal ya no corresponde a la señal en banda base, por lo que la señal detectada estará distorsionada.

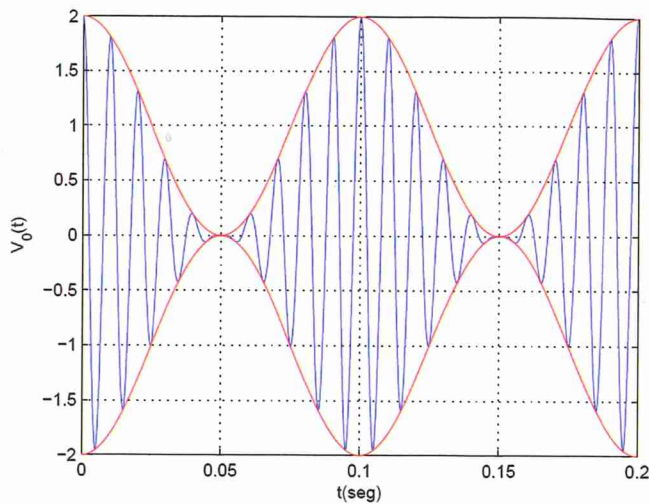


Figura 2.12. Modulación en AM completa $m = 1$.

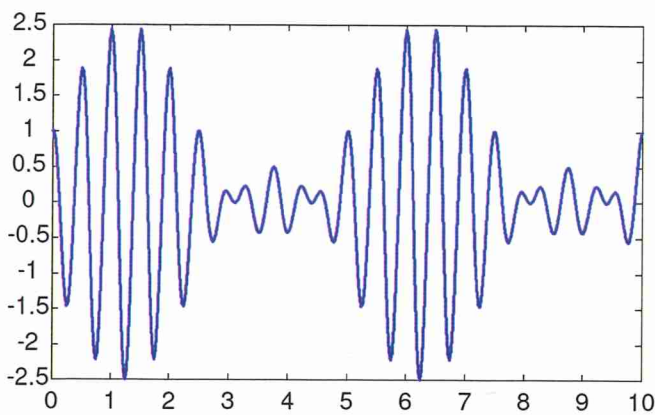


Figura 2.13. Sobremodulación en AM completa $m = 1,5$.

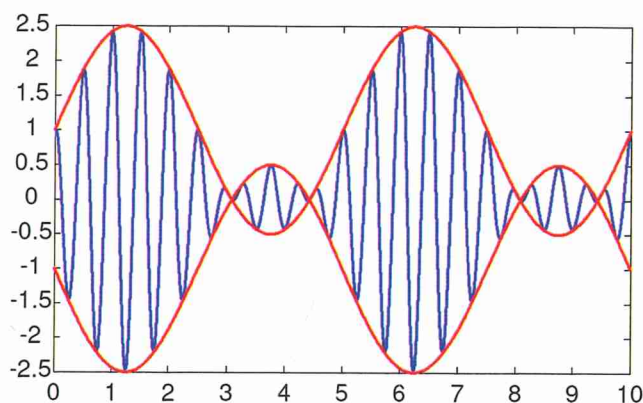


Figura 2.14. Distorsión de la envolvente por sobremodulación ($m = 1,5$).

Espectro de la señal de AM completa

El voltaje instantáneo de la señal de AM está dado por:

$$v_{AM}(t) = V_c \cos(\omega_c t) + \frac{mV_c}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t]$$

En la expresión anterior se identifican señales de tres frecuencias diferentes, una de amplitud V_c y frecuencia f_c , que corresponde a la portadora y cuya amplitud y frecuencia no dependen de la señal moduladora. Las otras dos señales tienen frecuencias $(f_c + f_m)$ y $(f_c - f_m)$ separadas por debajo y arriba de la portadora por f_m , cada una de amplitud $mV_c/4$. Estas dos señales se designan como **bandas laterales** y son simétricas respecto a la frecuencia de la portadora.

$$V_{AM}(f) = \frac{V_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{mV_c}{4} [\delta(f - (f_c + f_m)) + \delta(f + (f_c + f_m)) + \delta(f - (f_c - f_m)) + \delta(f + (f_c - f_m))]$$

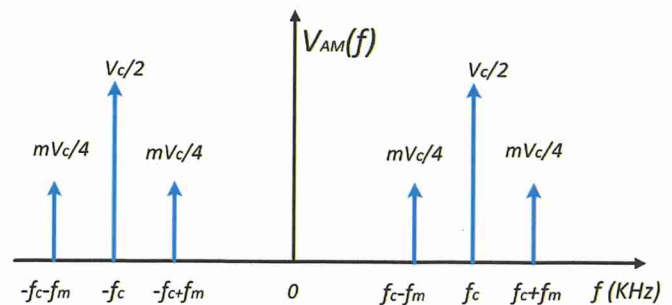


Figura 2.15. Espectro de modulación de tonos puros en AM.

Los tonos que aparecen en las frecuencias $\pm (f_c + f_m)$ se denominan **bandas laterales superiores**, y los que aparecen en $\pm (f_c - f_m)$, **bandas laterales inferiores**. Aunque el análisis anterior se ha hecho para señales de una sola frecuencia f_m , es decir, tonos puros, es igualmente válido si se trata de señales complejas en una banda de frecuencias $X(f)$.

$$V_{AM}(f) = \frac{V_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{mV_c}{2} [X(f - f_c) + X(f + f_c)]$$

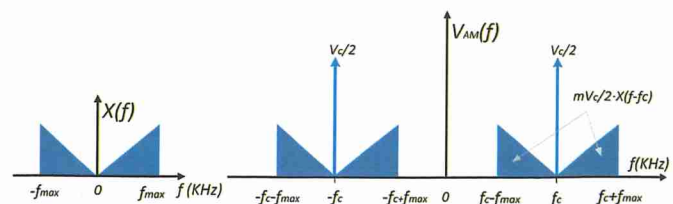


Figura 2.16. Espectro de modulación de señales complejas en AM.

Cada una de las bandas laterales contiene toda la información necesaria para recuperar la señal, si bien las componentes frecuenciales en la banda inferior están invertidas respecto a las de la banda superior. En cualquier caso, esto no representa mayor problema, ya que en la demodulación puede recuperarse con facilidad el espectro correcto. El hecho de que la señal en banda base al ser modulada haya duplicado su ancho de banda en la banda de paso, al desdoblarse en dos bandas laterales es, de hecho, un desperdicio del espectro de frecuencias. Del análisis anterior se puede concluir que, en AM completa, la eficiencia espectral es solo del 50 %.

Por otra parte, la portadora se transmite con su amplitud completa. En realidad esto no sería necesario, ya que la portadora, al ser de una frecuencia fija y conocida, no contiene información y puede reproducirse mediante un OL en el receptor. Por consecuencia, el hecho de transmitir la portadora completa, es también un desperdicio de potencia en el transmisor.

■ ■ ■ Potencia en AM completa

La contribución de cada una de las componentes de la señal modulada a su potencia total es proporcional al cuadrado del voltaje y es máxima cuando los términos que contienen al $\cos(\omega_c t)$ y $\cos(\omega_m t)$ valen 1. Así, si la potencia de la portadora es P_c , proporcional a V_c^2 , la de cada una de las bandas laterales es proporcional a $(mV_c/2)^2$, la potencia total puede expresarse como:

$$P_{t(AM)} = V_c^2 + 2 \left(\frac{mV_c}{2} \right)^2 = P_c \left(1 + \frac{2m^2}{4} \right) = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = P_c + 2P_{SB}$$

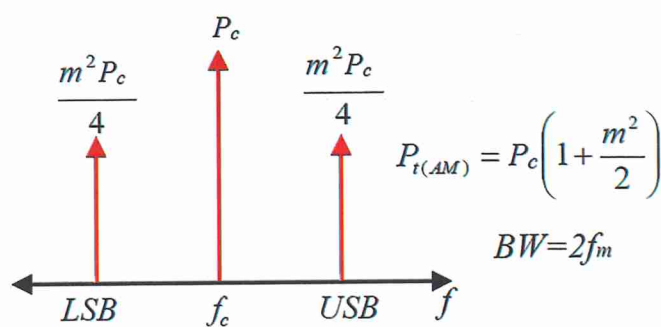


Figura 2.17. Espectro de magnitud de P de la señal de AM completa.

De acuerdo a esto, si la potencia útil de señal es la contenida en una cualquiera de las dos bandas laterales, $m^2 P_c / 4$ y la potencia total es $P_{t(AM)}$, se puede hablar de una **eficiencia de modulación** como la relación entre la potencia útil de señal y la potencia total de la señal modulada:

$$\eta_{AM} = \frac{P_{util}}{P_{t(AM)}} = \frac{P_{SB}}{P_{t(AM)}} = \frac{m^2}{4 \left(1 + \frac{m^2}{2} \right)}$$

Para el caso de una señal modulada al 100 % ($m = 1$), se tendrá la eficiencia máxima, igual a 0,166, es decir, solamente el 16,6 % de la potencia transmitida corresponde a energía útil de señal. Este concepto de eficiencia de modulación, no debe confundirse con el de la **eficiencia del transmisor**, en que intervienen otros factores muy diferentes. Intentaremos aclarar esa diferencia.

La eficiencia de un transmisor está condicionada principalmente por la eficiencia de sus amplificadores de potencia y puede hablarse de una **eficiencia global** del sistema transmisor como la relación entre la potencia que entrega a la antena y la potencia que se le suministra para que funcione y que incluye, entre otras cosas, la potencia que consumen los sistemas de ventilación o refrigeración, las pérdidas en motores y transformadores, además de la potencia suministrada a todos los circuitos eléctricos y electrónicos que lo componen. Desde el punto de vista de un transmisor de AM, la señal que entrega a la antena es una señal de AM completa. Para el transmisor, esta es la señal útil de salida. Sin embargo, desde el punto de vista de **información útil transmitida**, la potencia de esta solo constituye el 16,66 % de la potencia total entregada por el transmisor. Veamos esto con algunos números.

Actividad resuelta

- 2.1. Supóngase un transmisor de AM que, modulado al 100 %, entrega 50 kW a la antena y cuya eficiencia global es de un 30 %.

- a) ¿Qué consumo hace el transmisor de la línea de suministro de energía eléctrica?

$$P_{consumida} = P_{t(AM)} / \eta_{global} = 50 / 0,3 = 166,7 \text{ kW}$$

- b) ¿Qué pasa con el resto de la potencia suministrada no entregada a la antena?

$$P_{perdida} = P_{consumida} - P_{t(AM)} = 166,7 - 50 = 116,7 \text{ kW}$$

Los 116,7 kW restantes se pierden en forma de calor en el transmisor, si bien parte de ellos son necesarios para mantener en funcionamiento los sistemas de ventilación que extraen el calor.

- c) En cualquier caso, ¿por cuánto pasará la factura la empresa que suministra la energía eléctrica?

Por los 166,7 kW completos.

- d) ¿Cuál es la potencia útil de señal para el transmisor?

Los 50 kW entregados a la antena constituyen la potencia útil de señal para el transmisor.

e) ¿Cuál es la información útil transmitida?

$P_{\text{información útil}} = P_{t(AM)} \cdot 16,66 \% = 50 \cdot 0,1667 = 8,335 \text{ kW}$ corresponden a la información útil transmitida en cualquiera de las dos bandas laterales.

f) Indica el porcentaje de la eficiencia global para $m = 1$ como sería para un índice $m < 1$.

Si fueron necesarios 166,7 kW para transmitir una información contenida solo en 8,335 kW, la eficiencia global resulta solo de un 5 %.

Si el índice de modulación es menos del 100 %, esta eficiencia resulta aún bastante menor.

Relaciones de voltaje y corriente en AM completa

El voltaje, ya sea pico o eficaz, de una señal modulada en amplitud está relacionado con la potencia por:

$$P_{AM} = \frac{V_{AMRMS}^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_{AM}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{V_{AM}^2}{2R}$$

Donde R es la resistencia de carga a la que se entrega la potencia, por ejemplo una antena. De igual manera, la relación entre el voltaje y la potencia de la portadora es:

$$P_c = \frac{V_{cRMS}^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_c}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{V_c^2}{2R}$$

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{\left(\frac{mV_{cRMS}}{2}\right)^2}{R} = \frac{\left(\frac{mV_c}{2\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{m^2 \cdot V_c^2}{8R}$$

Sustituyendo P_{AM} y P_c en $P_{t(AM)}$ obtenemos la relación de tensiones:

$$V_{AM} = V_c \cdot \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}}$$

Y, aplicando un razonamiento similar para la corriente, se tiene:

$$I_{AM} = I_c \cdot \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}}$$

La ecuación anterior proporciona un método para medir el índice de modulación, midiendo la corriente de antena con y sin modulación. Así, se tiene que:

$$m = \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_{AM}}{I_c} \right)^2 - 1 \right]}$$

Actividad resuelta

2.2. Para una onda AM DSBFC con un voltaje pico de la portadora no modulada $V_c = 10 \text{ V}$, una resistencia de carga $R_L = 10 \Omega$, y el coeficiente de modulación $m = 1$, determina:

- Potencias de la portadora y las bandas laterales superior e inferior.
- Potencia total de la banda lateral.
- Potencia total de la onda modulada.
- Dibuja el espectro de potencia.
- Repite los pasos anteriores para un índice de modulación $m = 0,5$.

Solución:

a) La potencia de la portadora se encuentra sustituyendo en la ecuación:

$$P_c = \frac{V_c^2}{2 \cdot R_L} = \frac{10^2}{2 \cdot 10} = 5 \text{ W}$$

La potencia de la banda lateral superior e inferior se encuentra sustituyendo en la ecuación:

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{m^2 \cdot V_c^2}{8R} = \frac{1^2 \cdot 10^2}{8 \cdot 10} = 1,25 \text{ W}$$

b) La potencia total de la banda lateral es:

$$P_{sbt} = \frac{m^2 \cdot P_c}{2} = \frac{1^2 \cdot 5}{2} = 2,5 \text{ W}$$

c) La potencia total en la onda modulada se encuentra sustituyendo en la ecuación:

$$P_{t(AM)} = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = 5 \left(1 + \frac{1^2}{2} \right) = 7,5 \text{ W}$$

d) El espectro de potencia se muestra mediante la Figura 2.18:

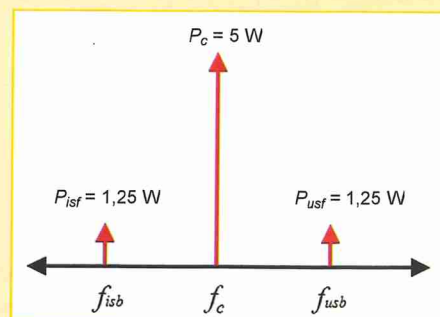


Figura 2.18. Espectro de potencia de AM para la actividad.

e) La potencia de la portadora es:

$$P_c = \frac{10^2}{2 \cdot 10} = 5 \text{ W}$$

La potencia de la banda lateral superior e inferior es:

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{0,5^2 \cdot 10^2}{8 \cdot 10} = 0,3125 \text{ W}$$

El total de la potencia de la banda lateral es:

$$P_{sbt} = \frac{0,5^2 \cdot 5}{2} = 0,625 \text{ W}$$

El total de potencia de la onda modulada es:

$$P_{t(AM)} = 5 \left(1 + \frac{0,5^2}{2} \right) = 5,625 \text{ W}$$

El espectro de potencia es:

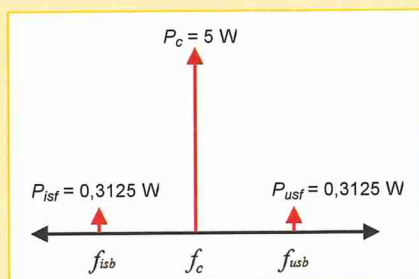


Figura 2.19. Espectro de potencia de AM para el último apartado de la actividad.

■ ■ ■ Ancho de banda de la señal de AM completa

La modulación de AM completa da lugar a dos bandas laterales, cada una con un ancho de f_{max} (Hz), por lo que el ancho de banda total de la señal modulada será:

$$AB_{AM} = BW_{AM} = (f_c + f_{max}) - (f_c - f_{max}) = 2f_{max}$$

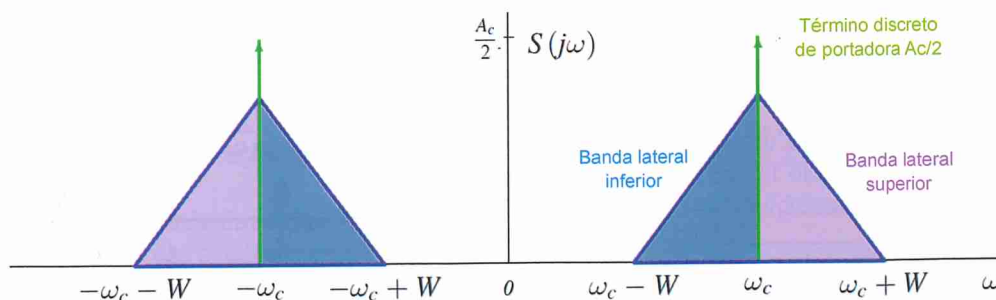


Figura 2.21. Espectro de la señal de AM completa.

Donde f_{max} es la componente espectral de mayor frecuencia de la señal moduladora. Al igual que en el caso de modulación sinusoidal pura, cada banda lateral contiene totalmente la información de la señal en banda base, por lo que estrictamente, este tipo de modulación consume el doble del espectro requerido para transmitir la información requerida para recuperar totalmente la señal original en el receptor y se pueden conseguir mayores eficiencias transmitiendo solo una de las bandas laterales.

■ ■ ■ Configuración de las bandas en AM completa

Supongamos un mensaje $m(t)$ cuyo espectro $TF M(j\omega)$ es $M(j\omega) = 0$ para $|\omega| > 2\pi f_{max}$, es decir, ocupa una banda W tal y como se ilustra en la Figura 2.20.

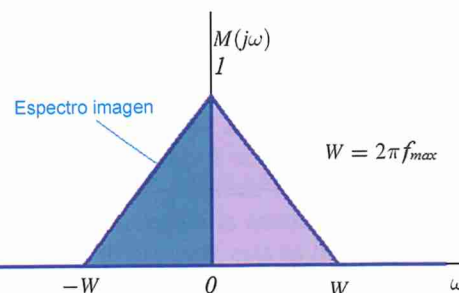


Figura 2.20. Espectro del mensaje.

El espectro $S(j\omega)$ de la Figura 2.21 es el producido por una señal en banda base que ocupa un ancho de banda de 0 a $f_{max} = W/2\pi$. Esta forma de representar el espectro como un triángulo es frecuente. Las bandas laterales superior e inferior son simétricas respecto a la portadora.

Ancho de banda de la señal modulada $BW_{AM} = 2 \cdot f_{max}$ Hz

■ ■ ■ La arquitectura de los transmisores de bajo y alto nivel para AM

Estos aspectos de eficiencia no tienen mucha importancia cuando la potencia de salida del transmisor es del orden de hasta unos centenares de watts. Sin embargo, se vuelven

cruciales en transmisores de potencias más altas, ya que la eficiencia redonda en el consumo de energía eléctrica y, por consecuencia, en el coste de operación del sistema transmisor.

Sabías que...

La arquitectura de los transmisores de AM completa varía en función de si se trata de transmisores de bajo nivel o transmisores de alto nivel.



En los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es se incorpora un documento sobre «La arquitectura de los transmisores de bajo y alto nivel para AM».

Actividad propuesta

2.8. Identifica y especifica los parámetros característicos del transmisor para radiodifusión AM 15 000/18 000 watts, DMW15000 que aparecen en la ficha del producto que se incorpora en los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es.

Demodulación coherente de AM

La **demodulación o detección** es un proceso no lineal. La idea fundamental es obtener la forma de onda de la moduladora (información) de la portadora modulada, normalmente convertida a una frecuencia intermedia, como ilustra la Figura 2.22.

La demodulación de AM completa constituye uno de los casos particulares en que, si bien puede utilizarse un mezclador, este no es indispensable y resulta más simple y económico utilizar un **detector de envolvente**, constituido por un simple diodo. En este tipo de detector la entrada es la señal modulada de RF y no se requiere otra señal de un oscilador local. El circuito se ilustra en la Figura 2.23.

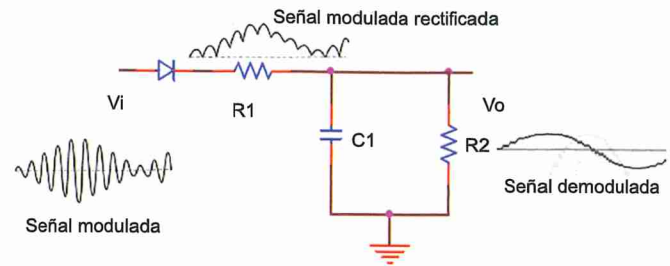


Figura 2.23. Detector de envolvente.

En la **demodulación síncrona o coherente** se utiliza un mezclador seguido de un filtro de paso bajo. La señal de AM completa puede demodularse empleando esta técnica. En la Figura 2.24 se ilustra el diagrama de bloques de un demodulador coherente de AM completa.

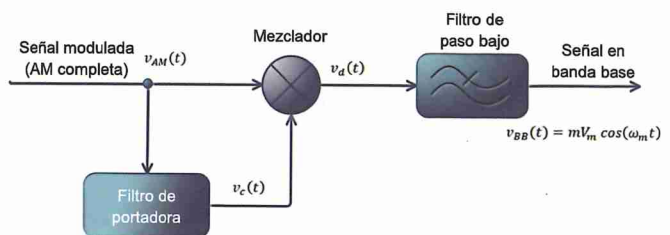


Figura 2.24. Demodulación coherente de AM completa.

En la detección o demodulación coherente, una de las entradas al mezclador es la señal modulada y la otra una señal de frecuencia y fase iguales a las de la portadora con que fue modulada la señal y que puede ser generada por un OL. Puesto que la señal de AM completa contiene a la portadora, en este caso no es necesario generarla localmente y puede extraerse de la señal modulada de entrada mediante un filtro de ranura. Así, la señal modulada está dada por:

$$v_{AM}(t) = V_c \cos(\omega_c t) + \frac{mV_c}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t]$$

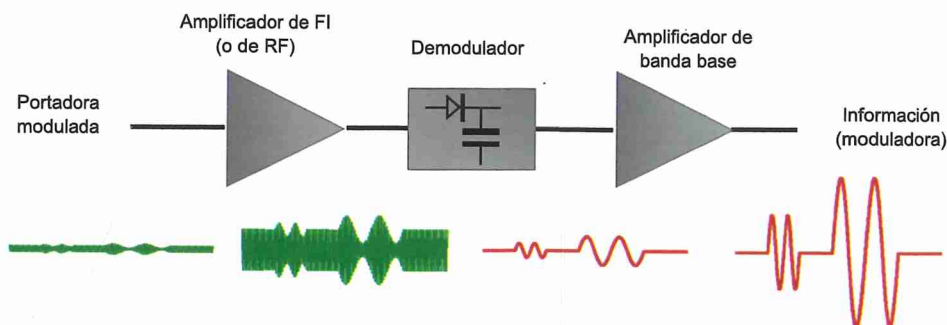


Figura 2.22. Demodulador de amplitud.

y la señal de salida del filtro de portadora es:

$$v_c(t) = V'_c \cos(\omega_c t)$$

a la salida del mezclador se tiene:

$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_{AM}(t) \cdot v_c(t) = V'_c (1 + m \cos \omega_m t) \cos^2 \omega_c t \\ &= V'_c (1 + m \cos \omega_m t) \frac{1 + \cos 2\omega_c t}{2} \\ &= V'_c \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos 2\omega_c t}{2} + \frac{m \cos \omega_m t}{2} + \frac{m \cos \omega_m t \cos 2\omega_c t}{2} \right) \end{aligned}$$

En la expresión anterior se tienen varios términos, uno de ellos de corriente continua, otros dos a frecuencia del doble de la frecuencia de la portadora ($2\omega_c$), y otro a la frecuencia de la señal en banda base (ω_m) que es el que realmente interesa recuperar.

El término de corriente continua se puede eliminar simplemente mediante un condensador, y los otros dos, al doble de la frecuencia de la portadora, mediante un filtro de paso bajo, a cuya salida solo estará presente la señal en banda base deseada, de la forma:

$$v_{BB}(t) = mV_m \cos(\omega_m t)$$

Donde V_m es el voltaje máximo de la señal en banda base a la salida del filtro.

Una forma útil de representar el proceso de AM completa es mediante un diagrama vectorial como el ilustrado en la Figura 2.25.

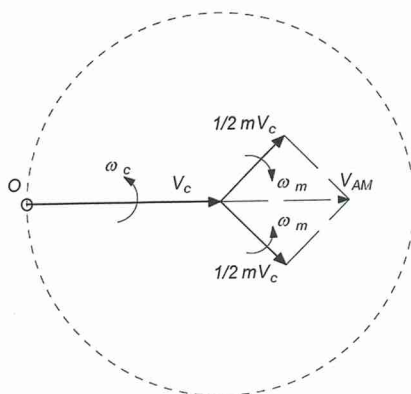


Figura 2.25. Representación vectorial de AM completa.

En este diagrama, el vector V_c cuya amplitud es igual a la de la portadora, gira alrededor del punto 0 con una frecuencia angular ω_c constante, igual a la de la portadora. El vector giratorio, en estas condiciones, representa a la portadora sin modulación. En el extremo del vector de la portadora se tienen otros dos vectores simétricos, de amplitud $mV_c/2$,

girando en sentidos opuestos con la misma velocidad angular, ω_m , igual a la frecuencia de la señal moduladora. Estos dos vectores representan a las dos bandas laterales de la señal modulada. La suma de los tres vectores, el de la portadora y los de las dos bandas laterales, da como resultado un vector de amplitud V_{AM} , colineal con V_c , cuya amplitud variará de forma continua según la señal moduladora. Para 100 % de modulación, V_{AM} variará entre 0 y $2V_c$.

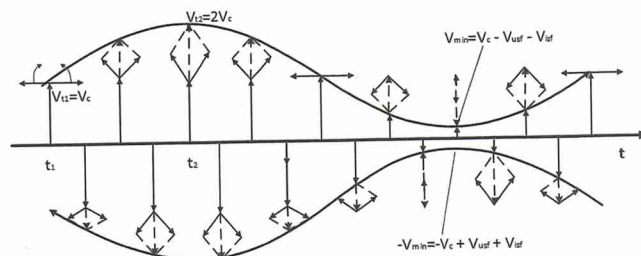


Figura 2.26. Representación de la adición fasorial produciendo la señal en AM completa.

V_{usf} = voltaje de la frecuencia lateral superior de amplitud $mV_c/2$.

V_{isf} = voltaje de la frecuencia lateral inferior de amplitud $mV_c/2$.

V_c = voltaje de la portadora.

La mínima amplitud negativa ocurre cuando la portadora está en su máximo valor negativo al mismo tiempo que las frecuencias laterales negativas y positivas están en sus máximos valores positivos ($-V_{min} = -V_c + V_{usf} + V_{isf}$).

Actividad resuelta

2.3. Supóngase que la entrada a un modulador de AM convencional es una portadora de 500 kHz con una amplitud de $V_p = \pm 20$ V. La segunda entrada es una señal modulante de 10 kHz de suficiente amplitud para causar un cambio en la onda de salida de $V_p = \pm 7,5$ V. Determina:

a) Las frecuencias laterales superior e inferior.

Las frecuencias laterales superior e inferior son simplemente las frecuencias de suma y diferencia, respectivamente.

$$f_{usf} = 500 \text{ kHz} + 10 \text{ kHz} = 510 \text{ kHz}$$

$$f_{isf} = 500 \text{ kHz} - 10 \text{ kHz} = 490 \text{ kHz}$$

b) Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación.

El coeficiente de modulación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$m = \frac{V_m}{V_c} = \frac{7,5 \text{ V}}{20 \text{ V}} = 0,375$$

El porcentaje de modulación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$M = \frac{V_m}{V_c} \cdot 100 = \frac{7,5 \text{ V}}{20 \text{ V}} \cdot 100 = 37,5 \%$$

- c) Amplitud pico de la portadora modulada y de los voltajes de frecuencia lateral superior e inferior.

$$v_{AM}(t) = V_c \cos(\omega_c t) + \frac{mV_c}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t]$$

$$V_{uf} = V_{uf} = \frac{mV_c}{2} = \frac{0,375 \cdot 20 \text{ V}}{2} = 3,75 \text{ V}$$

$$V_c = 20 \text{ V}$$

- d) Máxima y mínima amplitudes de la envolvente.

La amplitud máxima y mínima de la envolvente son determinadas de la siguiente manera:

$$V_{max} = V_c + V_m = 20 + 7,5 = 27,5 \text{ V}$$

$$V_{min} = V_c - V_m = 20 - 7,5 = 12,5 \text{ V}$$

- e) Expresión de la onda modulada.

$$v_{AM}(t) = 20 \cos(2\pi 500kt) + 3,75 [\cos 2\pi 510kt + \cos 2\pi 490kt]$$

- f) Dibuja el espectro de salida.

El espectro de salida se muestra mediante la Figura 2.27.

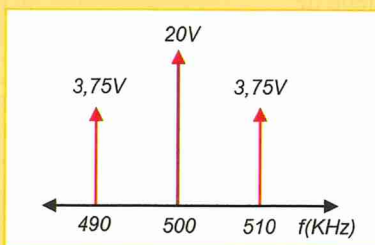


Figura 2.27. Espectro de salida para el ejemplo.

- g) Traza la envolvente de salida.

La envolvente modulada se muestra mediante la Figura 2.28.

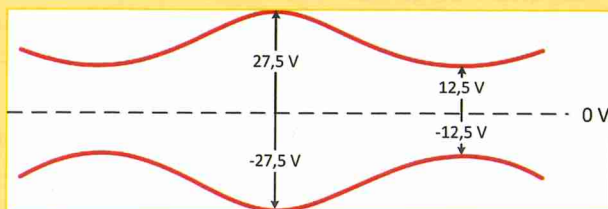


Figura 2.28. Envolvente de AM para la actividad.

Actividades propuestas

- 2.9. Para un modulador de AM DSBFC con una frecuencia de portadora $f_c = 100 \text{ kHz}$ y una frecuencia máxima de la señal modulante $f_m(max) = 5 \text{ kHz}$, determina:

- Límites de frecuencia para las bandas laterales superior e inferior.
- Ancho de banda.
- Frecuencias laterales superior e inferior producidas cuando la señal modulante es un tono de 3 kHz de frecuencia simple.
- Dibuja el espectro de la frecuencia de salida para las dos señales modulantes.

- 2.10. Para la forma de onda de AM mostrada en la Figura 2.29, determina:

- Amplitud pico de las frecuencias laterales superior e inferior.
- Amplitud pico de la portadora no modulada.
- Cambio pico en la amplitud de la envolvente.
- Coefficiente de modulación.
- Porcentaje de modulación.

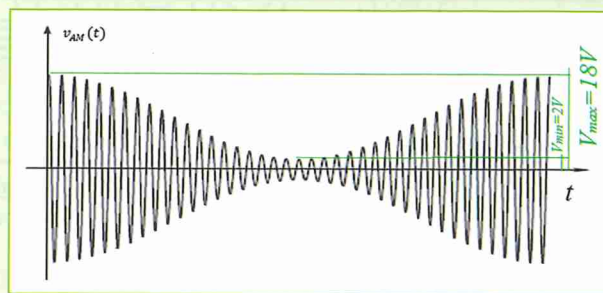


Figura 2.29. Señal modulada sin sobremodulación en AM completa.

2.2.2. Modulación de amplitud con doble banda lateral (DBL o DSB)

Se puede definir como AM con la portadora suprimida con el objeto de ahorrar potencia.

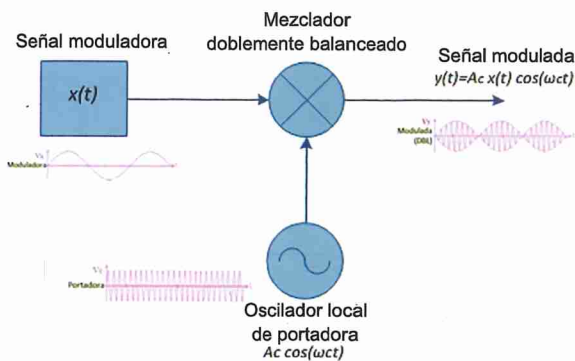


Figura 2.30. Modulador de DBL.

Sea $x(t)$ un mensaje que cumple las condiciones indicadas en los apartados anteriores; sea $x_c(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t)$ la portadora. La señal DSB se expresará como:

$$y(t) = x_{DSB}(t) = A_c \cdot x(t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

Sabías que...

El proceso de mezcla de la portadora con la señal moduladora de frecuencia única da como resultado la supresión de la portadora, como se muestra en la Figura 2.31.

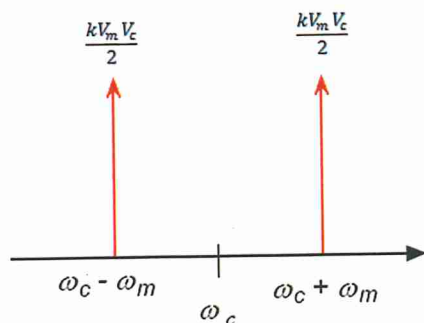


Figura 2.31. Espectro de un tono modulado en amplitud, con doble banda lateral, sin portadora.

En los recursos digitales disponibles en www.parainfo.es se adjunta un anexo sobre «Modulación de amplitud con doble banda lateral».

2.2.3. Modulación de banda lateral única

El sistema de AM se modificó para aumentar la eficiencia al no tener que llevar la portadora. Esto produjo modulación DSB. Sin embargo, analizando el espectro de una señal DSB, se encuentra que aún hay redundancia ya que las dos bandas alrededor de f_c son simétricas. Por tanto, bastaría enviar una sola de las dos: la superior o la inferior. Por ejemplo, si el mensaje $x(t)$ tiene el siguiente espectro:

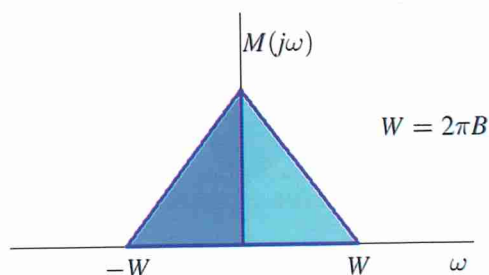


Figura 2.32. Espectro de magnitud de banda base.

Se puede tener USSB (*Upper Single Side Band* o Banda lateral superior) o LSSB (*Lower Single Side Band* o Banda lateral inferior).

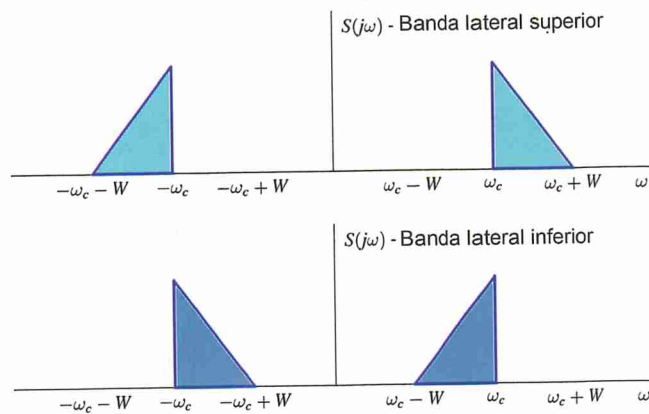


Figura 2.33. Espectro de la señal AM de BLU.

Cálculo de potencia de la señal SSB

La señal BLU superior, tiene un espectro con valor de cero para $|f| < f_c$, donde f_c es la frecuencia de la portadora:

$$s_{sup}(t) = A_c \cdot m(t) \cdot \cos(\omega_c t) - A_c \cdot \hat{m}(t) \cdot \sin(\omega_c t)$$

La señal BLU inferior, tiene un espectro con valor de cero para $|f| > f_c$:

$$s_{inf}(t) = A_c \cdot m(t) \cdot \cos(\omega_c t) + A_c \cdot \hat{m}(t) \cdot \sin(\omega_c t)$$

$\hat{m}(t)$ es la notación de la transformada de Hilbert de $m(t)$, la cual se obtiene de:

$$\hat{m}(t) = m(t) \cdot h(t) \text{ donde } h(t) = \frac{1}{\pi t}$$

$$H(j\omega) = \begin{cases} -j, & \omega > 0 \\ j, & \omega < 0 \\ 0, & \omega = 0 \end{cases}$$

En conclusión, podemos decir que BLU es un sistema que produce:

- **Eficiencia espectral:** 100 % ya que se elimina una banda lateral $BW_{BLU} = B$ Hz.
- **Es difícil de generar por filtrado:** porque necesitamos filtros muy abruptos, salvo que la señal en banda base no tenga componentes cerca de la frecuencia cero.
- **Eficiencia de potencia:** 100 %. La potencia será PSB, es decir:

$$P = P_{USSB} = P_{LSSB} = \frac{A_c^2}{4} S_x$$

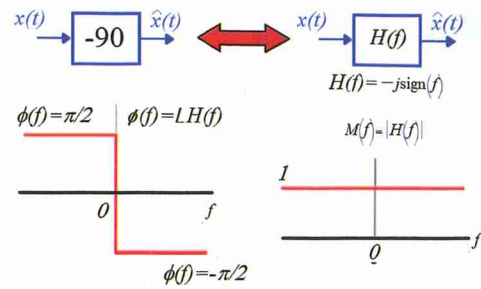


Figura 2.34. Generador de SSB por método de filtrado.

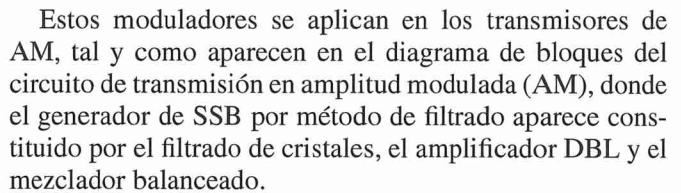
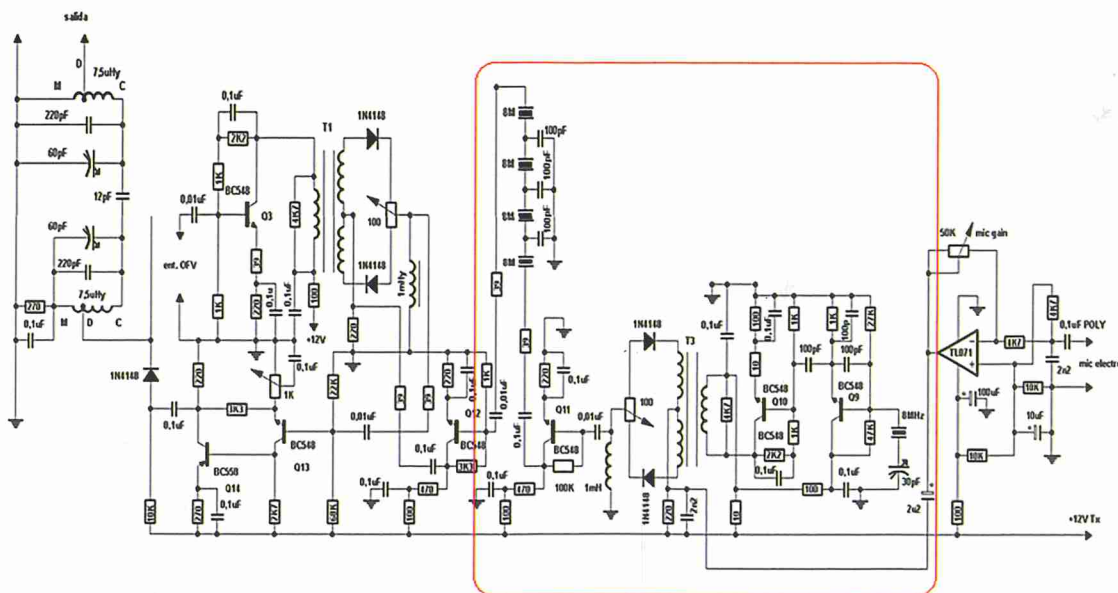
[illegible]

Figura 2.37. Diagrama de bloques del circuito de transmisión en amplitud modulada (AM).

El correspondiente diseño del circuito de transmisión en amplitud modulada (AM) es el siguiente, el modulador se encuentra entre Q12 y QT3.



43

Demoduladores SSB

En recepción se necesita un oscilador coherente sin ninguna deriva.

Para simplificar, a veces se utiliza un piloto añadido.

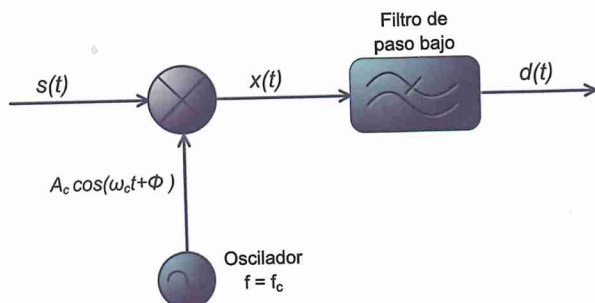


Figura 2.39. Demodulación de señales BLU.

La señal demodulada sin filtrar $x(t)$ es:

$$x(t) = \frac{1}{2} \cdot A_c \cdot m(t) \cdot \cos(\varnothing) \pm \frac{1}{2} \cdot A_c \cdot \hat{m}(t) \cdot \sin(\varnothing) + \text{términos } 2\omega_c$$

Y la señal $d(t)$ tras el filtro a f_c del demodulador síncrono es:

$$d(t) = \frac{1}{2} \cdot A_c \cdot m(t) \cdot \cos(\varnothing) \pm \frac{1}{2} \cdot A_c \cdot \hat{m}(t) \cdot \sin(\varnothing)$$

Actividad resuelta

2.4. La función de transferencia de un filtro cumple $H(f) = 0$ para $f < 900$ kHz y $H(f) = 1$ para $f > 1$ MHz. En la zona intermedia $H(f)$ está indeterminado. Se desea utilizarlo para una modulación BLU superior con una señal mensaje que no tiene componentes espectrales por debajo de 50 kHz. Determina la frecuencia de portadora necesaria para la BLU.

Solución:

Representando el diagrama del modulador de BLUS filtrando la banda lateral no deseada y viendo el papel del filtro en la generación de la USB podemos interpretar que la frecuencia de portadora viene de la relación:

Si $f_p = f_{\text{minFiltro}} - f_{\text{min}} = 1000 \text{ kHz} - 50 \text{ kHz} = 950 \text{ kHz}$, se comprueba que:

$f_{\text{BLUS min}} = f_{\text{minFiltro}} + f_{\text{min}} = 1000 \text{ kHz} + 50 \text{ kHz} = 1050 \text{ kHz}$, que deja pasar el filtro

$f_{\text{BLUI max}} = f_p - f_{\text{min}} = 950 \text{ kHz} - 50 \text{ kHz} = 900 \text{ kHz}$, que puede ser rechazada por el filtro

Luego $f_p = 950 \text{ kHz}$

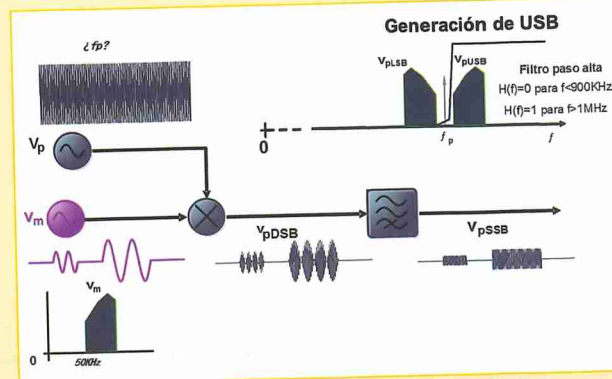


Figura 2.40. Modulación de SSB por filtrado de la banda lateral no deseada.

Actividades propuestas

2.11. Una señal $x(t)$ se modula en BLU y el resultado:

- Se puede demodular tanto coherentemente como no coherentemente.
- La señal moduladora $x(t)$ no puede tener componentes espectrales en frecuencia cero.
- Se necesita enviar el OL al demodulador.

2.12. Una modulación en banda lateral única analógica:

- Admite tanto demodulación coherente como no coherente.
- La potencia de portadora es la mitad de la potencia media.
- Puede utilizar un transformador de Hilbert para la generación.

2.2.4. Modulación de banda lateral vestigial (VSB)

Este tipo de modulación abreviado como AM-VSB puede considerarse como intermedio entre la modulación de AM completa y la de BLU. Se emplea únicamente en la transmisión analógica de televisión terrestre y por cable y en transmisión digital de televisión en el sistema estadounidense, que se designa como 8-VSB.

Sabías que...

Los primeros estándares de transmisión de televisión fueron con modulación de banda lateral vestigial (VSB).



En los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es se incorpora un documento sobre «Modulación de banda lateral vestigial (VSB)».

2.2.5. Modulación en cuadratura de fase (QAM)

En AM y en DSB-SC, la señal modulada ocupa el doble del ancho de banda que la señal en banda base. Esto es, en cierta forma, un desperdicio del ancho de banda que puede eliminarse o bien transmitiendo solamente una de las bandas laterales, o bien transmitiendo dos señales diferentes, con el mismo ancho de banda base, empleando dos portadoras de la misma frecuencia, pero en cuadratura de fase, es decir desfasadas entre sí 90° . Esta forma de modulación se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.41.

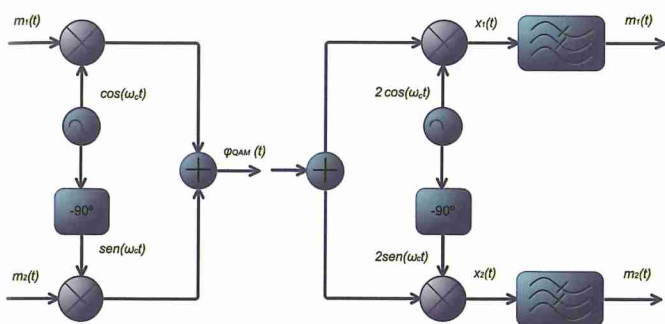


Figura 2.41. Modulación y demodulación en cuadratura de fase.

En la parte izquierda de la Figura 2.41 se muestra el modulador, y en la derecha, el demodulador.

Las señales de información, o moduladoras son $m_1(t)$ y $m_2(t)$. La primera modula una portadora de frecuencia angular ω_c ($\cos(\omega_c t)$) y la segunda, a otra portadora de la misma frecuencia que la primera, pero desfasada 90° ($-\pi/2$). Las dos señales se suman para producir una señal de dos bandas laterales, pero en cuadratura de fase, que puede expresarse como:

$$\varphi_{QAM}(t) = m_1(t) \cdot \cos(\omega_c t) + m_2(t) \cdot \sin(\omega_c t)$$

Se ve, efectivamente, que si $m_1(t)$ y $m_2(t)$ son tonos puros, de forma:

$$m_1(t) = A \cdot \cos(\omega_{m1} t)$$

$$m_2(t) = A \cdot \cos(\omega_{m2} t)$$

la señal resultante tiene dos bandas laterales, en cada una de las cuales están contenidas, a su vez, las dos señales en banda base. Estas dos señales pueden recuperarse en el receptor mediante un detector o demodulador síncrono, como se ilustra en la porción derecha de la Figura 2.41. La salida del mezclador de la parte superior de esta figura, $x_1(t)$, está dada por:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= 2 \cdot \varphi_{QAM}(t) \cdot \cos(\omega_c t) = 2 \cdot [m_1(t) \cdot \cos(\omega_c t) + \\ &+ m_2(t) \cdot \sin(\omega_c t)] \cdot \cos(\omega_c t) = m_1(t) + m_1(t) \cdot \cos(2\omega_c t) + \\ &+ m_2(t) \cdot \sin(2\omega_c t) \end{aligned}$$

Los dos últimos términos desaparecen después del filtrado de la señal a paso bajo, dejando la salida deseada, $m_1(t)$. Puede hacerse un análisis similar para $m_2(t)$. Este sistema de modulación se conoce como modulación en cuadratura de fase o multiplexado en cuadratura y se designa habitualmente como QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Por consecuencia, es posible transmitir dos señales del mismo ancho de banda base B , por un canal de ancho de banda $2B$ es decir $BW_{QAM} = 2BW_{BB}$, como una señal de doble banda lateral, sin portadora, multiplexada o modulada en cuadratura. El canal superior se designa como **canal en fase** y el inferior, como **canal en cuadratura**. Este tipo de modulación encuentra numerosas aplicaciones en comunicaciones, tanto analógicas como digitales.

Sabías que...

El espacio de señal o diagrama de constelación es un método de representación en el plano complejo de los estados de símbolo en términos de amplitud y fase en los esquemas de modulación tales como QAM o PSK.

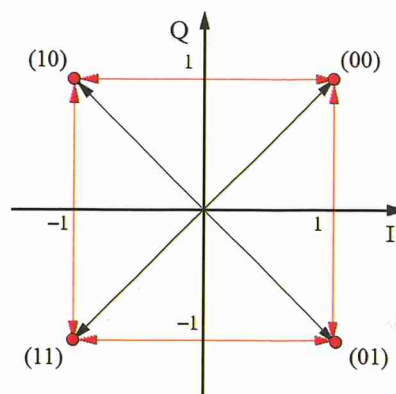


Figura 2.42. Constelación 4-QAM.



En los recursos digitales disponibles en www.paraminfo.es se ha incorporado un anexo sobre «Diagrama de constelación».

La QAM, de manera semejante a todos los esquemas de modulación con portadora suprimida, impone requisitos muy severos en lo que respecta a la reinserción de la portadora local en el receptor. Un pequeño error en la fase o la frecuencia de la portadora reinsertada en el detector no solo resulta en distorsión o pérdida de la señal, sino también en interferencia entre canales.

■ ■ ■ Sistemas analógicos que utilizan la modulación QAM

La QAM es utilizada en los sistemas PAL y NTSC de televisión analógica para transmitir las dos señales diferenciales de crominancia (R-Y) y (B-Y).

La señales de información (la crominancia en el sistema PAL) o moduladoras son $m_1(t) = U(B,Y)$ y $m_2(t) = V(R,Y)$, se definen como las componentes de diferencia al azul y de diferencia al rojo, del vector color como representa la Figura 2.44.

Actividad resuelta

- 2.5. Una señal 16-QAM se recibe con un receptor que incorpora un recuperador de portadora que comete $16,8^\circ$ de error en el ajuste de su fase. Dibuja la constelación de la señal recibida:

Solución:

Los símbolos puedan reconstruirse a pesar del error en el ajuste de su fase a partir del valor de un único eje de la constelación, de forma que si se pierde el valor del otro eje durante la transmisión, todavía podamos reconstruir el símbolo enviado.

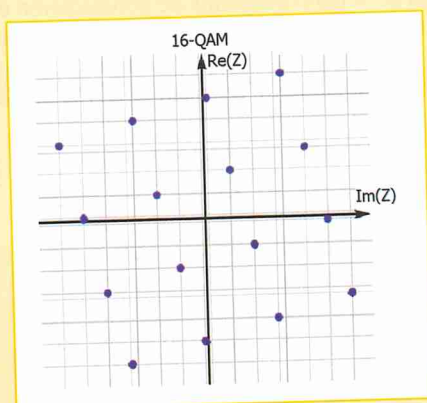


Figura 2.43. Diagrama de constelación 16-QAM rotada.

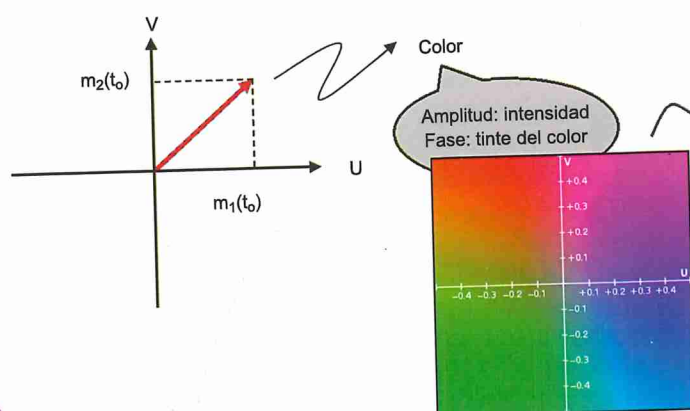


Figura 2.44. Representación gráfica del sistema PAL.

Si nos fijamos en la representación gráfica de la Figura 2.44, veremos que la gráfica se divide en seis pequeñas cajas marcadas como R, G, B, M, Cy y Y. Estas son las siglas para el rojo, verde, azul, magenta, cian y amarillo, los colores primarios y secundarios usados en la TV a color.

■ 2.3. Modulación angular PM y FM

En la modulación angular, se hace variar la frecuencia o la fase de la portadora. Así, la modulación angular tiene dos variantes: modulación de frecuencia (FM) y modulación de fase (PM). En ambos casos, la amplitud de la portadora se mantiene constante.

Sabías que...

A las modulaciones angulares PM y FM se les designa también como de envolvente constante.



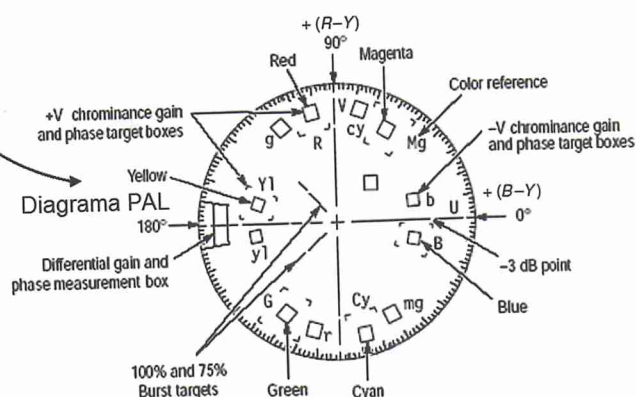
En los recursos digitales disponibles en www.parainfo.es se ha incorporado un anexo sobre «Modulación angular PM y FM».

Actividad resuelta

- 2.6. Para un modulador de FM se tiene una sensibilidad de desviación de frecuencia $K_{FM} = 30 \text{ kHz/V}$ y opera a una frecuencia portadora de $f_c = 175 \text{ MHz}$. Determina la frecuencia de salida para un valor instantáneo de la señal moduladora $x(t)$ igual a:
- 150 mV.
 - 2V.

Solución:

Dado que la frecuencia instantánea es la frecuencia precisa de la portadora en un instante de tiempo, se define



como la primera derivada con respecto al tiempo de la fase instantánea. La frecuencia angular instantánea se muestra matemáticamente como:

$$\omega_i(t) = \frac{d}{dt} [\omega_c t + k_1 v_m(t)] = \omega_c + k_1 \omega_m v_m \text{ rad/seg}$$

Al sustituir a $2\pi f_c$ por ω_c da la frecuencia instantánea:

$$f_i(t) = f_c + k_{FM} \left[\frac{\text{rad/seg}}{\text{voltio}} \right] v_m(t) \quad [\text{Hz}]$$

$$\text{a) } f_i = (175 \cdot 10^6 \text{ Hz}) + (30 \cdot 10^3 \text{ Hz/V}) \cdot (150 \cdot 10^{-3} \text{ V}) = 175\,004\,500 \text{ Hz} = 175,0045 \text{ MHz}$$

$$\text{b) } f_i = (175 \cdot 10^6 \text{ Hz}) + (30 \cdot 10^3 \text{ Hz/V}) \cdot (-2 \text{ V}) = (175 \cdot 10^6 \text{ Hz}) - (30 \cdot 10^3 \text{ Hz/V}) \cdot (2 \text{ V}) = 174\,940\,000 \text{ Hz} = 174,94 \text{ MHz}$$

Actividad resuelta

2.7. Una señal en rampa de la Figura 2.45 entra a un modulador FM. Por error se demodula con un demodulador PM. Dibuja la señal obtenida.

Solución:

La señal obtenida por el demodulador de PM será la integración de la señal original que se moduló en FM, es decir, la rampa que es la representación de una ecuación lineal se integra a una parabólica que es la representación de una ecuación cuadrática.

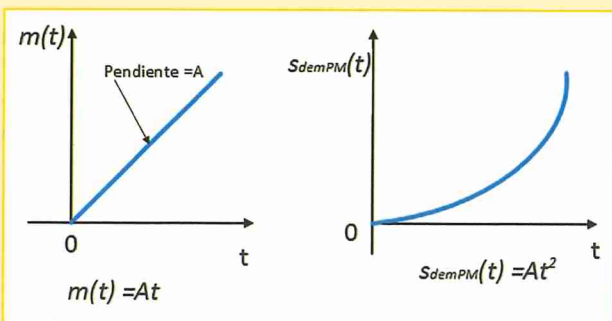


Figura 2.45. Señal de la rampa de información y señal obtenida en el demodulador.

2.3.1. Espectro de la modulación angular

Se estudia, por ser la forma más sencilla, el caso de una modulación por un tono puro, es decir, se intenta conocer el espectro de una señal:

El espectro de frecuencias en la modulación de frecuencia:

$$y_{FM}(t) = V_c \cdot \cos[\omega_c t + \beta \text{sen}(\omega_m t)]$$

que puede expandirse como:

$$y_{FM}(t) = V_c \cdot [\cos \omega_c t \cdot \cos(\beta \text{sen}(\omega_m t)) - \text{sen} \omega_c t \cdot \text{sen}(\beta \text{sen}(\omega_m t))]$$

Esta expresión contiene funciones del tipo $\text{sen}(\text{sen } x)$ y $\cos(\cos x)$ y la solución puede darse solo en términos de una serie infinita de **funciones de Bessel**. En realidad, aquí no es importante entrar en el tratamiento de estas funciones, basta decir que el desarrollo de la anterior expresión puede expresarse como:

$$y_{FM}(t) = V_c \{ J_0(\beta) \text{sen} \omega_c t + J_1(\beta) [\text{sen}(\omega_c + \omega_m)t - \text{sen}(\omega_c - \omega_m)t] + J_2(\beta) [\text{sen}(\omega_c + 2\omega_m)t - \text{sen}(\omega_c - 2\omega_m)t] + J_3(\beta) [\text{sen}(\omega_c + 3\omega_m)t - \text{sen}(\omega_c - 3\omega_m)t] + \dots \}$$

Las funciones $J_0(\beta), J_1(\beta), J_2(\beta) \dots J_n(\beta)$ son funciones de Bessel de primera clase, orden n y argumento β .

Se ve que la señal modulada en frecuencia (o fase) contiene un número teóricamente infinito de bandas laterales de amplitudes $V_c J_n(\beta)$, separadas de la frecuencia central $n\omega_m$, de modo que para evaluar la amplitud de una banda lateral determinada, es necesario conocer el valor de la función de Bessel correspondiente.

En la Tabla 2.1 se dan los valores de las funciones de Bessel de orden 0 a 16, para valores del argumento β de 0 a 8.

En la Figura 2.46 se muestra la gráfica de las funciones de Bessel de orden 0 a 5, que corresponden a las amplitudes de la portadora y de las primeras cinco bandas laterales para diferentes índices de modulación.

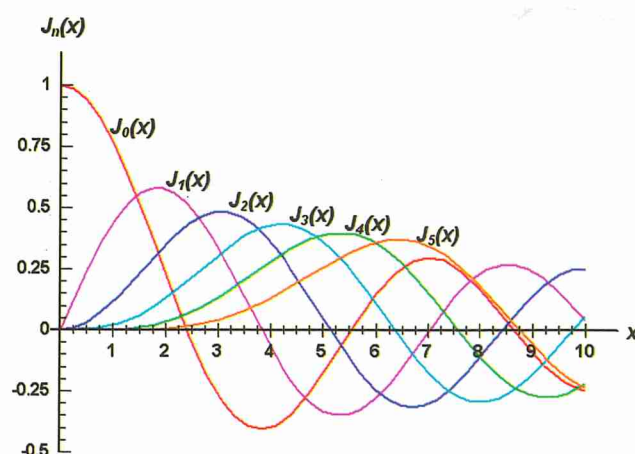


Figura 2.46. Amplitudes de la portadora y de las primeras cinco bandas laterales para índices de modulación de 0 a 10.

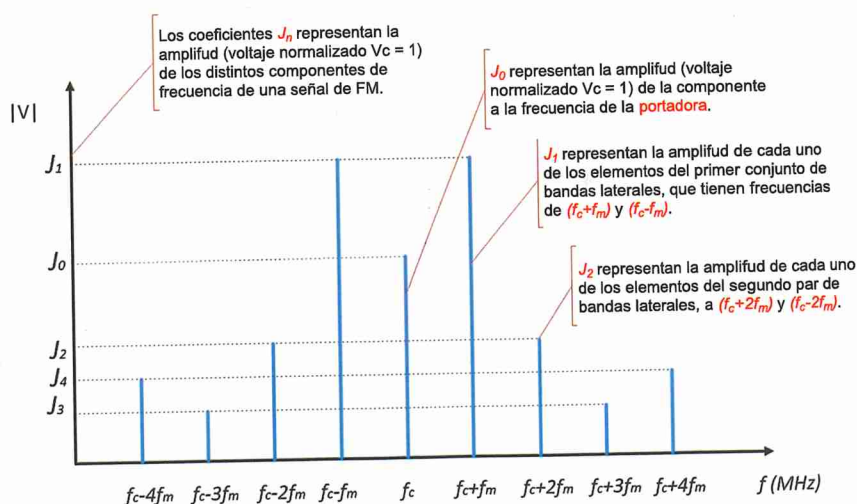
Tabla 2.1. Valores de las funciones de Bessel

β	Orden																
	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}	J_{15}	J_{16}
0,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	0,98	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5	0,94	0,24	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	0,77	0,44	0,11	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,5	0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0	0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0	0,40	0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5,0	0,18	0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-
6,0	0,15	0,28	0,24	0,11	0,36	0,36	0,25	0,13	0,06	0,02	-	-	-	-	-	-	-
7,0	0,30	0,00	0,30	0,17	0,16	0,35	0,34	0,23	0,13	0,06	0,02	-	-	-	-	-	-
8,0	0,17	0,23	0,11	0,29	0,10	0,19	0,34	0,32	0,22	0,13	0,06	0,03	-	-	-	-	-

De lo anterior se pueden extraer varias conclusiones importantes:

1. El espectro de una señal modulada en frecuencia contiene un componente de la portadora y un número in-

finito de bandas laterales localizadas simétricamente respecto a la portadora, a frecuencias $f_m \pm 2f_m \pm 3f_m$ etc. En este aspecto, la modulación de frecuencia es completamente diferente a la de amplitud en que, como máximo, solo se tienen dos bandas laterales.



- Para el caso especial de β mucho menor que la unidad, solo los coeficientes de Bessel $J_0(\beta)$ y $J_1(\beta)$ tienen valores significativos, de modo que la señal modulada en frecuencia está compuesta por la portadora y únicamente dos bandas laterales a $f_c \pm f_m$. Esta situación corresponde a un caso especial de FM, designado como **FM de banda estrecha** y no debe confundirse con la modulación de amplitud.
- En FM, la envolvente de la señal modulada es constante, en tanto que en AM la envolvente es variable. En FM la información está contenida en la desviación de frecuencia, que depende de la amplitud de la señal moduladora y en la rapidez de dicha desviación, que a su vez depende de la frecuencia de la señal moduladora.
- La amplitud de la portadora varía de acuerdo a $J_0(\beta)$ y, a diferencia de AM, la amplitud de la portadora en FM depende del índice de modulación β . La explicación física de esta propiedad estriba en el hecho de que la amplitud de la señal FM es constante, de modo que la potencia promedio de una señal de FM también es constante. Cuando se modula en frecuencia a la portadora, la potencia de las bandas laterales se obtiene a expensas de la potencia original de la portadora, haciendo, por consecuencia, que la amplitud de la portadora varíe en función de β y pudiendo, incluso, ser cero para ciertos valores de β . La potencia promedio de una señal modulada en frecuencia está dada por la relación:

$$P = \frac{1}{2} V_c^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta)$$

En donde V_c es el voltaje pico de la portadora sin modulación y:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) = 1$$

La potencia total en FM se reduce a:

$$P = \frac{1}{2} V_c^2$$

En las Figuras 2.48, 2.49 y 2.50 se muestra el espectro discreto de amplitud de una señal modulada en frecuencia, normalizada con respecto a la amplitud de la portadora, para el caso de una señal moduladora de frecuencia fija y amplitud variable.

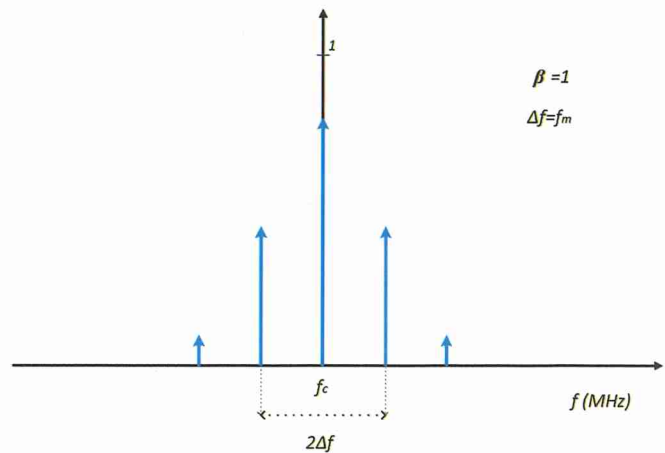


Figura 2.48. Espectro de la señal FM para $\beta = 1$.

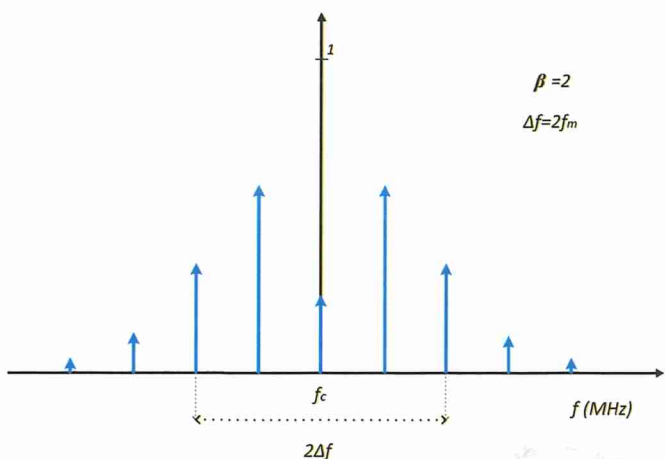


Figura 2.49. Espectro de la señal FM para $\beta = 2$.

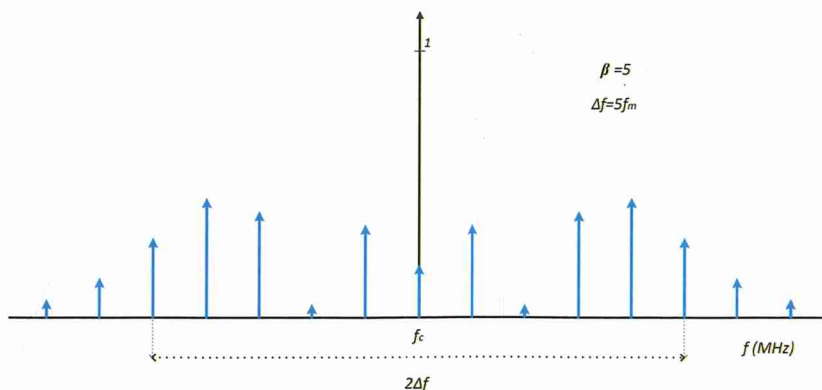


Figura 2.50. Espectro de la señal FM para $\beta = 5$.

Como se puede apreciar, la desviación de frecuencia y, por consecuencia, el ancho de banda de la señal modulada, **aumenta** con la amplitud de la señal moduladora, es decir, con el índice de modulación β .

Análogamente, en la Figura 2.51 se muestra el espectro de una señal modulada en frecuencia, en la que ahora la señal moduladora tiene amplitud constante y frecuencia variable. En este caso, la desviación de frecuencia, Δf , es constante y, por consecuencia, también el ancho de banda significativo, $2 \Delta f$.

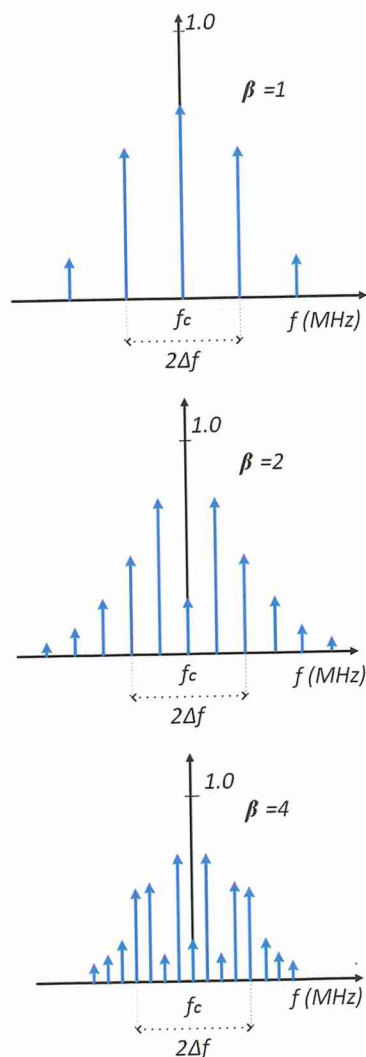


Figura 2.51. Espectro para una señal moduladora de amplitud constante y frecuencia variable.

Demodulación FM

Se utiliza un **discriminador**: circuito que genera una tensión proporcional a la desviación instantánea de frecuencia.

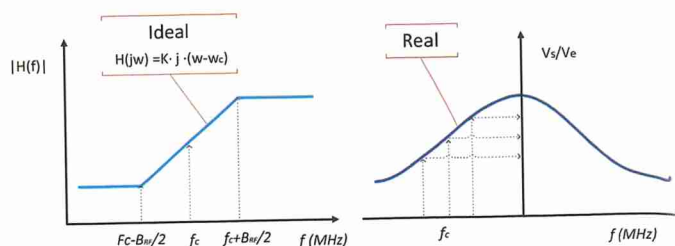


Figura 2.52. Demodulación FM.

Que equivale a derivar con respecto al tiempo y detectar la amplitud.

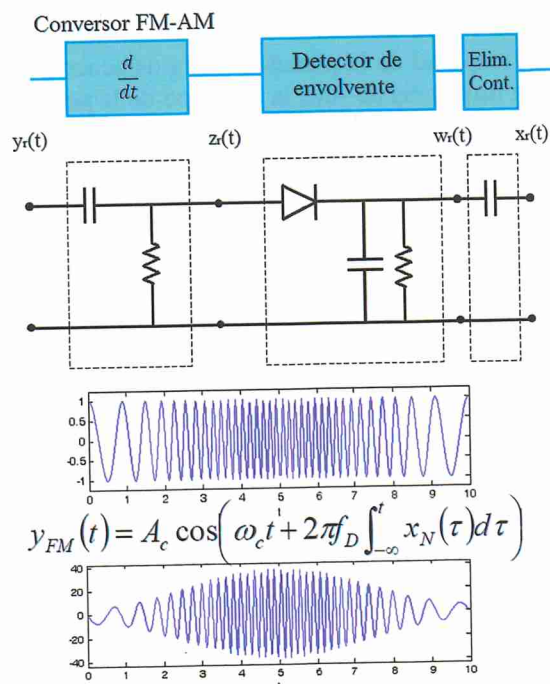


Figura 2.53. Implantación de la demodulación FM.

Actividad resuelta

2.8. Una senoide de frecuencia 5 kHz entra a un modulador FM con una frecuencia portadora de $f_c = 15$ MHz, que produce una desviación de frecuencia de la portadora de 15 kHz. Determina a qué frecuencias se obtienen las componentes de mayor potencia a la salida.

Solución:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{15 \text{ kHz}}{5 \text{ kHz}} = 3$$

Consultando la Tabla 2.1 de los valores de las funciones de Bessel comprobamos que para el índice de modulación de frecuencia.

$\beta = 3$ se tiene $J_n(\beta)$, máxima para $n = 2$.

Con lo que las frecuencias a las que se obtienen componentes de mayor potencia a la salida son:

$$f = f_c \pm n f_m = f_c \pm 2 f_m = 15 \text{ MHz} \pm 10 \text{ kHz}$$

Por tanto, para la frecuencia:

$$f = 15010 \text{ kHz y } f = 14990 \text{ kHz}$$

Actividades propuestas

2.13. Calcula la potencia (expresada en dBm) de una señal de 1V de amplitud modulada en FM por un tono de 1 kHz, con una relación de desviación de 5, sobre una carga de 1 Ω .

2.14. En una transmisión con modulación FM, aumentar la potencia de la señal moduladora significa:

- Incrementar el ancho de banda ocupado.
- Incrementar la potencia transmitida.
- No se modifica ni la potencia ni el ancho de banda de la señal transmitida.

2.3.2. Modulación angular de banda estrecha

Cuando el índice de modulación es pequeño, es decir, $\beta \ll 1$, el ancho de banda es, en este caso para la modulación angular, el mismo que en AM completa, es decir, el doble del ancho de banda de la señal moduladora:

$$BW_{NBPM} = 2 \cdot f_m \text{ Hz}$$

Es decir, solo un par de bandas laterales tienen magnitud significativa y, por tanto, en cuanto al BW necesario para transmisión, existe una similitud con AM.

La expresión:

$$y_{FM}(t) = V_c \cdot [\cos(\omega_c t) \cdot \cos(\beta \sin(\omega_m t)) - \sin(\omega_c t) \cdot \sin(\beta \sin(\omega_m t))]$$

Para $\beta \ll 1$ puede aproximarse por:

$$\begin{aligned} \cos[\beta \sin(2\pi f_m t)] &\approx 1 \\ \sin[\beta \sin(2\pi f_m t)] &\approx \beta \sin(2\pi f_m t) \end{aligned}$$

que puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} y_{NBPM}(t) &= V_c \left(\cos(2\pi f_c t) - \sin(2\pi f_c t) \cdot \beta \sin(2\pi f_m t) \right) = \\ &= V_c \left\{ \cos(2\pi f_c t) - \frac{\beta}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\beta}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t] \right\} \end{aligned}$$

y equivale a una señal de AM completa, con un desfase de 180° en la banda lateral inferior.

Este tipo de modulación se designa como **FM de banda estrecha** o *Narrow Band Frequency modulation (NBFM)*.

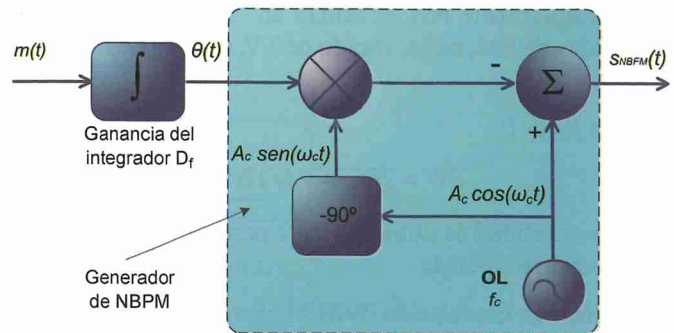


Figura 2.54. Generación de NBFM y de NBPM.

El mismo esquema de modulación pero sin el integrador general la modulación se denomina **PM de banda estrecha** o *Narrow Band Phase Modulation (NBPM)*.

$$y_{NBPM}(t) = V_c \cos(2\pi f_c t) - \theta(t) \sin(2\pi f_c t)$$

A pesar de la similitud de las expresiones, y de los espectros, es posible apreciar claramente las diferencias entre AM y NBFM:

- En AM se obtenían variaciones de amplitud de la portadora, permaneciendo su frecuencia constante. En NBFM, en cambio, la envolvente de amplitud es constante.
- En AM, la portadora y las bandas laterales están en fase; en NBFM, las bandas laterales están en cuadratura con la portadora.

2.3.3. Modulación angular de banda ancha

Según aumenta el valor del índice de modulación, β , aumenta también el número de bandas laterales, lo que es resultado de que la modulación en frecuencia no es un proceso lineal, es decir, no hay una relación lineal entre el dominio del tiempo y el de frecuencia.

Las amplitudes de la portadora (*frecuencia central*) y de las bandas laterales, en número infinito, dependen del valor de β , que es la que determina el valor de la función de Bessel, que expresa la amplitud correspondiente. Es importante hacer notar que, para ciertos valores de β , la amplitud de la portadora es cero, es decir, solo se tienen las bandas laterales. Aunque en FM, el número de bandas laterales, como se mencionó antes, es infinito, en la práctica el espectro de una señal modulada en FM se limita a un ancho de banda en que la energía de la señal es del orden del 99 % de

la energía de la señal en banda base. Esta es una aproximación válida, ya que la distorsión que se introduce en la señal transmitida no es significativa.

La modulación de frecuencia de banda ancha o *Wide Band Frequency Modulation* (WBFM) o también denominada simplemente FM se utiliza en las aplicaciones más conocidas de FM, radio, sonido de TV, enlaces de microondas, etc.

Para $\beta \gg 1$:

$$BW = 2\beta f_m = 2\Delta f \text{ Hz}$$

La posibilidad de utilizar $\beta \gg 1$ permite un mayor nivel de la señal recuperada.

Utilizar la modulación WBFM incrementa el ancho de banda, lo cual obliga a limitar el índice de modulación, compromiso que fija finalmente la máxima desviación Δf como norma general.

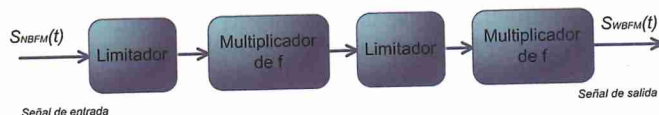


Figura 2.55. Generación de la WBFM.

2.4. Modulaciones digitales

El sistema de transmisión digital que nos interesa en radio- comunicaciones digitales se puede componer de la utilización de un modelo discreto equivalente de transmisión en banda base válido para otros sistemas de telecomunicacio-

nes, al que se le acopla una modulación paso banda, para adaptarse al canal de RF constituido por ondas de radio u ondas hertzianas.

Sabías que...

Para la transmisión digital estamos hablando de una señal portadora analógica sinusoidal que es modulada de acuerdo con una cadena de bits.



En los recursos digitales disponibles en www.parainfo.es se ha incorporado un anexo sobre «Introducción a las modulaciones digitales».

Sabías que...

Transmitir en banda base significa enviar una señal digital sobre un canal sin cambiarla a analógica.



En los recursos digitales disponibles en www.parainfo.es se ha incorporado un anexo sobre «Modulaciones digitales en banda base».

2.4.1. Modulaciones digitales paso banda

En cada período de símbolo se transmite una señal cuyo contenido espectral se encuentra concentrando alrededor de una portadora.

Las ventajas de modular en paso banda son las mismas que en las modulaciones analógicas.

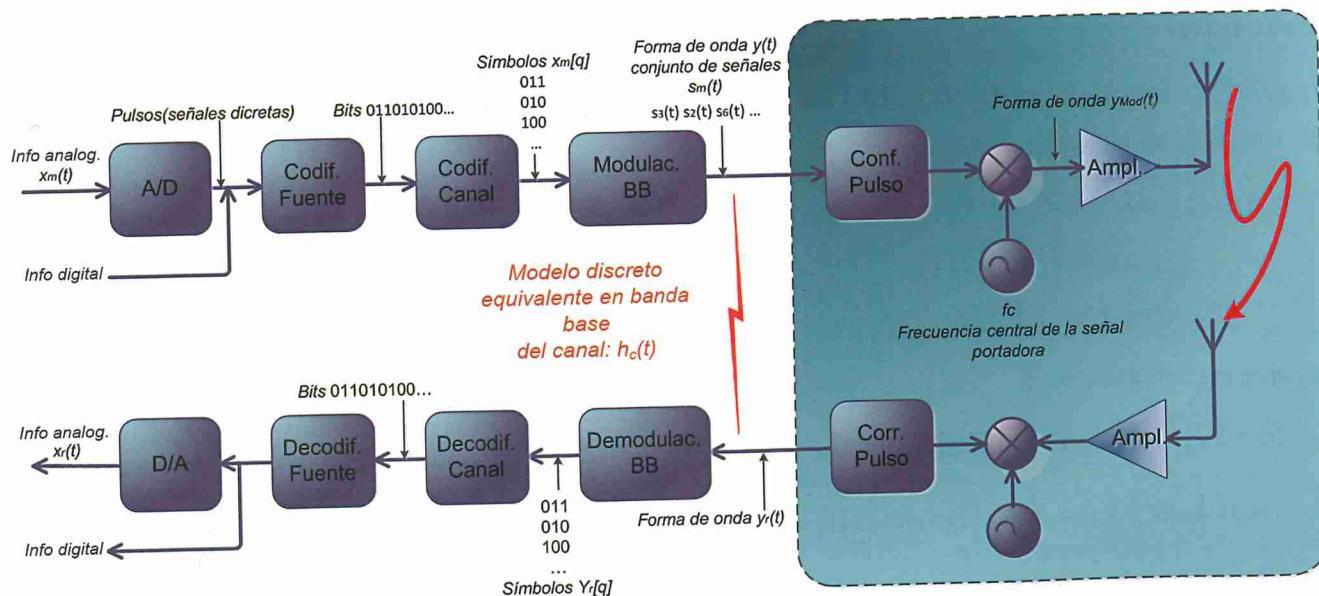


Figura 2.56. Cadena de transmisión digital.

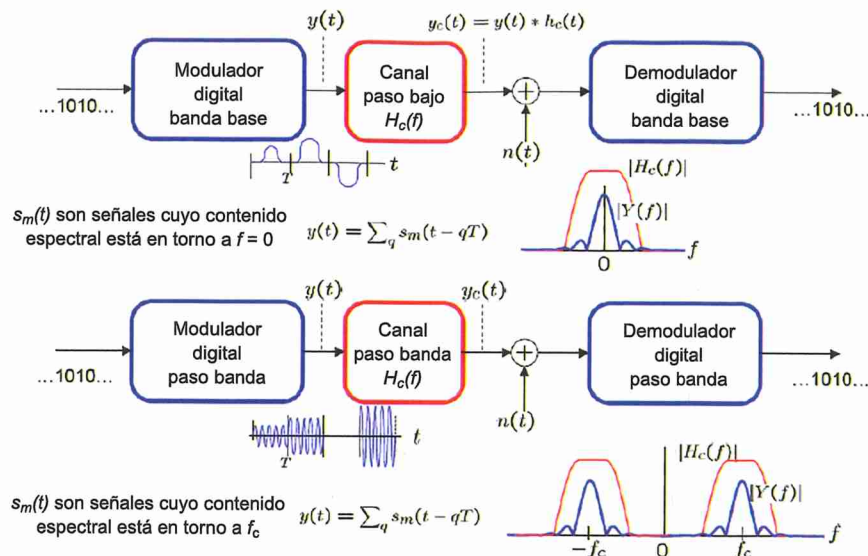


Figura 2.57. Concepto modulación digital paso banda.

Parámetros importantes

- Ancho de banda: eficiencia espectral (Figura 2.58).

$$e = \frac{R_b}{B}$$

- Probabilidad de error.
 - De bit (P_b).
 - De símbolo (P_s) debido al ruido que acompaña a la señal, el resultado del muestreo es aleatorio. Si la señal recibida $y_r(t)$ es con poco ruido (P_e baja) y al revés.

$$P_b = f(P_s)$$

- Con codificación Gray:

$$P_b = \frac{P_s}{\log_2(M)}$$

Representación mediante constelaciones

La señal transmitida se puede descomponer en función de alguna base ortonormal, de forma que la señal se pueda representar como un vector (Figura 2.60).

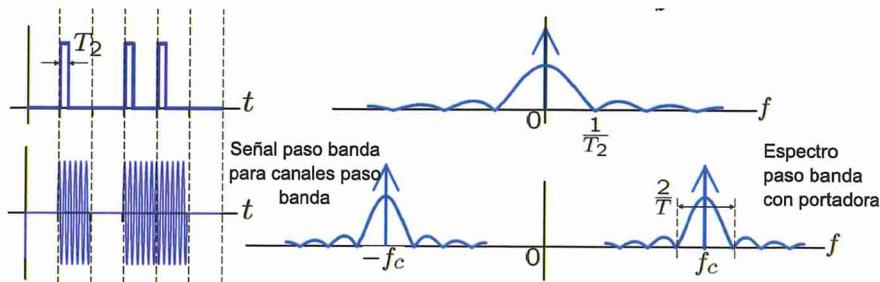


Figura 2.58. Espectro de la señal transmitida.

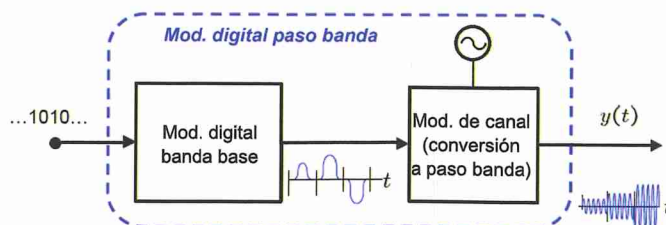


Figura 2.59. Representación como un vector.

Por ejemplo, esta base puede tener dos elementos: $\cos(\omega_c t)$ y $\sin(\omega_c t)$, y podemos representar cada símbolo como un vector con la amplitud de las componentes en fase y cuadratura. Por ejemplo:

$$y(t) = s_m(t) = V_{Im} \cdot g(t) \cdot \cos(\omega_c t) - V_{Qm} \cdot g(t) \cdot \sin(\omega_c t) = I \cdot \cos(\omega_c t) - Q \cdot \sin(\omega_c t)$$

La base elegida puede ser:

$$\{g(t) \cos(\omega_c t), g(t) \sin(\omega_c t)\}$$

Y para un conjunto con $V = \{+1, -1\}$ tanto para I como para Q , la representación de los puntos en la constelación serán los símbolos de modulación que componen el alfabeto —la asignación de bits a cada símbolo suele hacerse mediante el código Gray, que consiste en que, entre dos símbolos adyacentes, los símbolos solo se diferencian en 1 bit, con lo que se logra minimizar la tasa de bits erróneos—, es decir todas las «palabras» que podrán usarse en un intercambio de información:

$$s_1(t) = (+V)g(t) \cos(\omega_c t) - (+V)g(t) \sin(\omega_c t)$$

$$s_2(t) = (-V)g(t) \cos(\omega_c t) - (+V)g(t) \sin(\omega_c t)$$

$$s_3(t) = (-V)g(t) \cos(\omega_c t) - (-V)g(t) \sin(\omega_c t)$$

$$s_4(t) = (+V)g(t) \cos(\omega_c t) - (-V)g(t) \sin(\omega_c t)$$

$$\vec{s}_i = (s_{i1}, s_{i2})$$

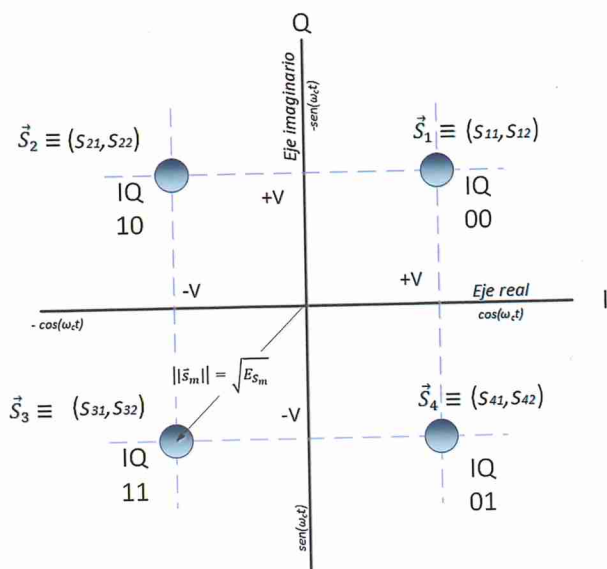


Figura 2.60. Diagrama de constelación.

El diagrama de constelación se puede describir como una fotografía instantánea y repetida que muestra los estados de decisión de una modulación digital. En estos diagramas se pueden observar errores en la fase y la amplitud que ocurren en la propagación de la señal.

Actividad resuelta

2.9. En una modulación por amplitud de pulsos, donde la señal modulada es $A_m \cos(\omega_0 t)$, siendo A_m la amplitud, parámetro que variará en función de la señal moduladora formada por señales asimétricas ($M = 2$): $s_m(t) = \{0, 1\}$ moduladas en BB por los símbolos $x_m[q] = 0, 1$. Calcula la constelación y la energía media por bit de los dos símbolos.

Solución:

Si tomamos amplitud $A_1 = 0$ (nula) para los bits 0 y amplitud $A_2 = A$ (real pura) para los bits 1, vemos que la constelación de la modulación por amplitud de pulsos (2 PAM) no está centrada en el origen.

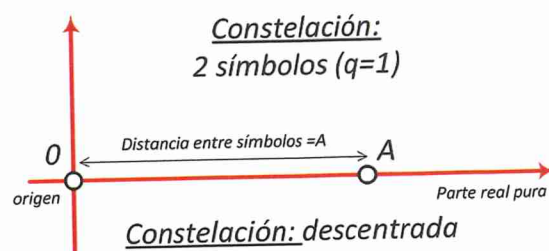


Figura 2.61. Actividad resuelta PAM.

La distancia entre símbolos será A , que nos protege frente a ruido. La energía media por bit será:

$$E_m = \frac{(E_{b0} + E_{b1})}{2} = \frac{1}{2}(A_1)^2 + \frac{1}{2}(A_2)^2 = \frac{1}{2}(0)^2 + \frac{1}{2}(A)^2 = \frac{A^2}{2}$$

Representación del diagrama vectorial

Un diagrama vectorial es un diagrama que muestra, sobre la constelación, los cambios que efectúa la envolvente de la portadora al cambiar de un símbolo a otro.

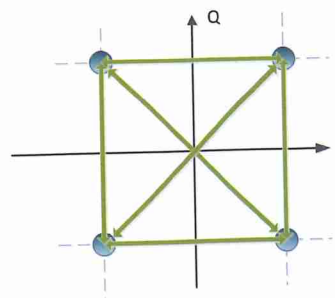


Figura 2.62. Diagrama vectorial.

Actividad resuelta

2.10. En una modulación por amplitud de pulsos, donde la señal modulada es $A_m \cos(\omega_0 t)$, siendo A_m la amplitud, parámetro que variará en función de la señal moduladora formada por señales simétricas ($M = 2$): $s_m(t) = \{-1, 1\}$ moduladas en BB por los símbolos $x_m[q] = 0, 1$. Calcula el diagrama vectorial y la energía media por bit de los dos símbolos.

Solución:

Si tomamos amplitud $A_1 = -A/2$ para los símbolos -1 (bits 0) y amplitud $A_2 = A/2$ para los símbolos 1 (bits 1), vemos el diagrama vectorial de 2 PAM centrado en el origen.

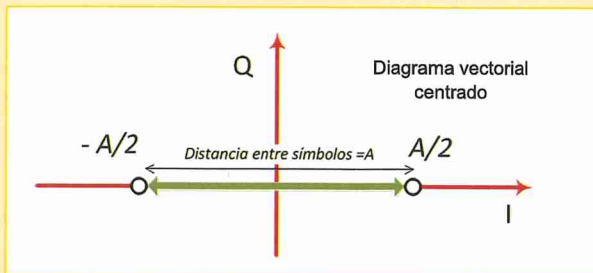


Figura 2.63. Actividad resuelta PAM2.

La distancia entre símbolos será A , que nos protege frente a ruido. La energía media por bit será:

$$E_m = \frac{(E_{b0} + E_{b1})}{2} = \frac{1}{2}(A_1)^2 + \frac{1}{2}(A_2)^2 = \frac{1}{2}\left(-\frac{A}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{A}{2}\right)^2 = \frac{2 \cdot A^2}{8} = \frac{A^2}{4}$$

Necesitamos la mitad de energía que la 2 PAM asimétrica para enviar la misma señal, con la misma calidad o inmunidad frente a ruido. O lo que es lo mismo, necesitamos 3 dB menos de potencia para enviar una señal con una relación señal-ruido (SNR) constante; o bien podemos invertir esos 3 dB en mejorar la SNR.

Representación del diagrama de ojos

El diagrama de ojo o patrón de ojo es un método utilizado para el análisis del comportamiento de los enlaces de transmisión. Permite analizar las formas de onda de los pulsos que se propagan en radiocomunicaciones, para lograr observar sus formas, desfases, niveles de ruido, potencias de las señales... y con ello apreciar la distorsión del canal (ISI), la severidad del ruido o interferencia y los errores de sincronismo en el receptor.

El diagrama de ojo corresponde a un gráfico que muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados.

Los diagramas de ojo muestran la magnitud de las componentes I y Q en el tiempo, por lo que se genera un diagrama por cada componente, en la Figura 2.64 se muestra para I . Para poderlos observar bien se trazan con persistencia de la señal.

En presencia de ISI, cuando el pulso no satisface el criterio de Nyquist, el diagrama tenderá a cerrarse verticalmente. Para una transmisión sin errores en ausencia de ruido, el ojo debe mantener cierta apertura vertical (a), o en caso contrario existirán señales de interferencia entre símbolos que provocarán errores. Cuando el ojo no esté totalmente

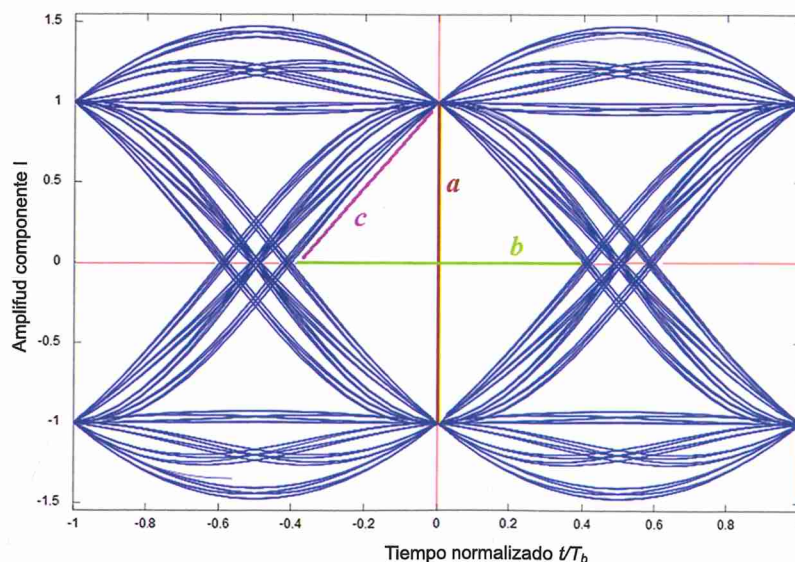


Figura 2.64. Diagrama de ojos.

cerrado, la interferencia entre símbolos reducirá el valor del ruido aditivo admisible. Por tanto, cuanto mayor apertura vertical, mayor inmunidad frente al ruido. El instante óptimo de muestreo será el punto de máxima apertura vertical del ojo, pero esto nunca puede ser logrado de forma precisa por un sistema práctico de recuperación de sincronismo. Por eso, la apertura horizontal del ojo (b) es también importante desde el punto de vista práctico. Cuanto mayor sea la pendiente (c), mayor sensibilidad tendrá el sistema a errores cometidos en la recuperación del sincronismo (errores en el cálculo del instante de muestreo).

2.4.2. Modulación por desplazamiento de amplitud

La ASK es una forma de modulación en la cual se representan los datos digitales como variaciones de amplitud de la onda portadora en función de los datos a enviar (señal moduladora).

Sabías que...

Existen dos tipos de modulación en amplitud:

- Por variación de nivel de la onda portadora ASK.
- Por supresión de onda portadora OOK.

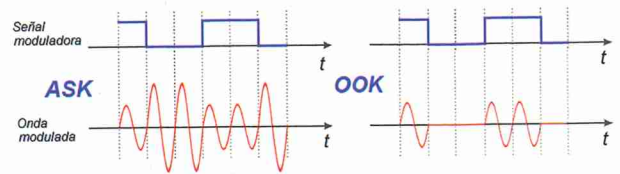


Figura 2.65. Dos tipos de modulación en amplitud.

En los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es se adjunta un anexo sobre «Modulación por desplazamiento de amplitud».

Actividad resuelta

- 2.11. Representa el efecto del filtrado del canal y del ruido en el canal, al observar el código de línea de onda polar NRZ para la secuencia 011001 recibida en un osciloscopio analógico, distinguiendo entre: a) un filtrado ideal de canal, b) una filtrado que produce interferencia intersimbólica (ISI) y c) ruido con ISI. Mostrando las presentaciones en el osciloscopio en el tiempo y los diagramas de ojo correspondientes a la señal contaminada con múltiples barridos, donde cada barrido está disparado mediante una señal de reloj y el ancho del barrido es un poco mayor que T_b .

Solución:

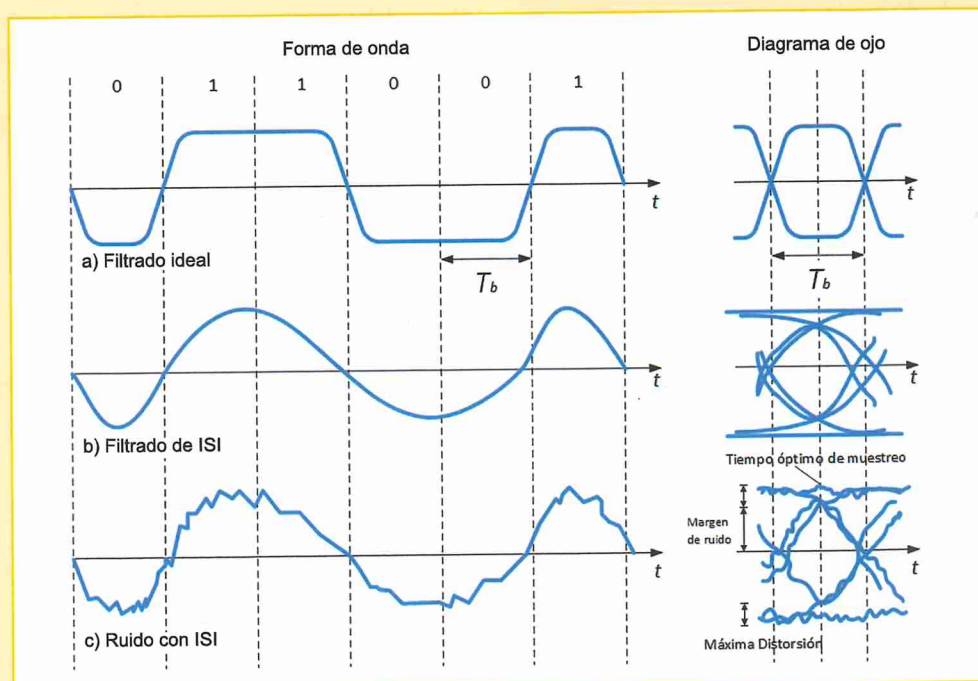


Figura 2.66. Forma de onda polar NRZ distorsionada con su diagrama de ojo correspondiente.

2.4.3. Modulación por desplazamiento de frecuencia

FSK, es una modulación en cuyo parámetro de la señal sinusoidal de la portadora que se hace variar es la frecuencia. Las señales FSK se pueden interpretar como una señal PAM que modula en frecuencia a una portadora.

$$s_m(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_m t), & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & \text{resto} \end{cases}$$

Cuando la señal moduladora es de origen digital, la señal modulada tomará un número discreto de valores de la frecuencia, iguales al número de valores que correspondan a la señal moduladora.

$$f_m = f_c + \frac{1}{2}(2m - M - 1)\Delta f, \rightarrow m = 1, \dots, M$$

La separación de frecuencias se escoge para que las señales sean ortogonales.

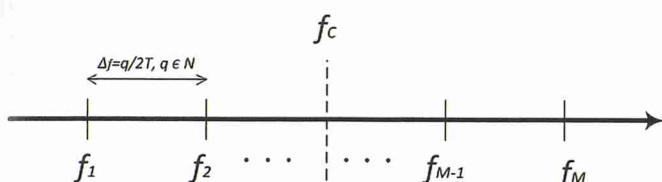


Figura 2.67. Separación de frecuencias.

2.4.4. Modulación por desplazamiento de fase (PSK)

La PSK es similar a la modulación en fase convencional, excepto que con PSK la señal de entrada es una señal digital binaria y son posibles un número limitado de fases de salida.

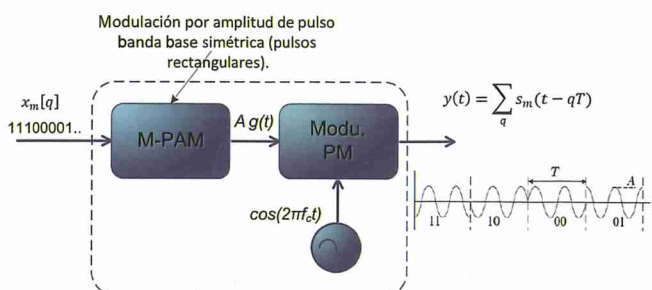


Figura 2.69. Modulación PSK M = 4.

Sabías que...

En la transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora.

En los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es se adjunta un anexo sobre «Modulación por desplazamiento de fase».

Sabías que...

Esta es la primera técnica que se implementó en términos prácticos, se continúa empleando en radiocomunicaciones (en estaciones de radiodifusión pública). La Figura 2.68 muestra este proceso.

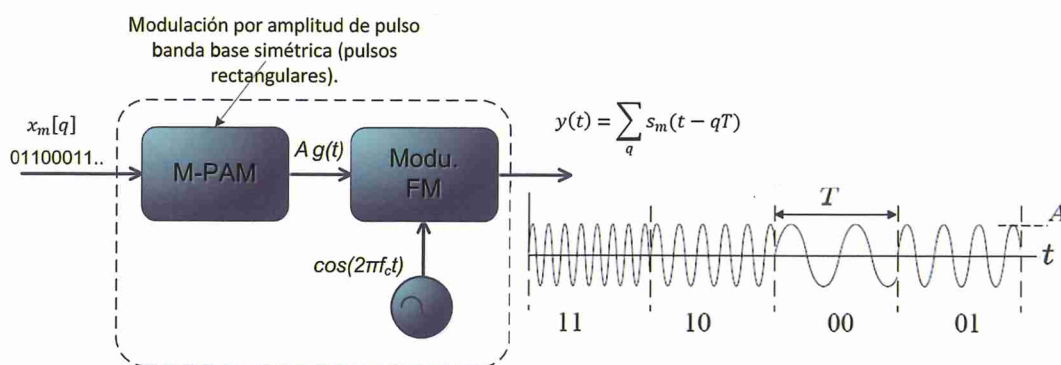


Figura 2.68. Modulación FSK M = 4.

En los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es se adjunta un anexo sobre «Modulación por desplazamiento de frecuencia».

2.4.5. Modulación multifase - Codificación multinaria

La codificación multinaria o codificación M-ario se deriva de la codificación binaria.

M-ario es un término derivado de la palabra (binario). La M es solo un dígito que representa el número de condiciones posibles o número de codificaciones. Las dos técnicas, BFSK y BPSK, son sistemas binarios donde solo hay dos condiciones posibles de salida, 1 y 0, es decir que esos sistemas $M = 2$.

En modulación digital mejora al codificar con valores de $M > 2$; por ejemplo, en el sistema QPSK hay cuatro niveles de salida, luego hay cuatro fases.

Podemos obtener la relación entre los bits de entrada al modulador o el número de codificaciones posibles a la salida con:

$$N = \log_2 M$$

Donde:

N = número de bits

M = número de condiciones posibles de salida con N bits.

Si se entran 2 bits en un modulador, antes de cambiar la salida:

$$2 = \log_2 M \rightarrow 2^2 = M = 4$$

es decir, con 2 bits hay cuatro condiciones de salida diferentes.

Si $N = 3$, obtenemos $M = 8$ condiciones de salida diferentes.

La transmisión por desplazamiento de fase M-ario (M-PSK) puede generarse por medio de dos portadoras en cuadratura moduladas por los componentes x e y de la envolvente compleja (en lugar de utilizar un modulador de fase).

$$s_m(t) = \text{Re} \left[g(t) e^{j2\pi(m-1)/M} e^{j2\pi f_c t} \right], \quad m = 1, 2, \dots, M \quad 0 \leq t \leq T$$

$$s_m(t) = g(t) \cos \left[2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M} (m-1) \right] =$$

$$= g(t) \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{M} (m-1) \right) \cdot \cos (2\pi f_c t) - g(t) \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{M} (m-1) \right) \cdot \sin (2\pi f_c t)$$

Entrada binaria		Fase de Salida QPSK
Q	I	
0	0	$\pi(1-1)/2 = 0^\circ$
0	1	$\pi(2-1)/2 = 90^\circ$
1	0	$\pi(3-1)/2 = 180^\circ$
1	1	$\pi(4-1)/2 = 270^\circ$

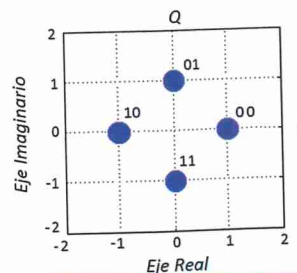
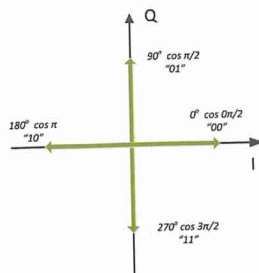


Figura 2.71. Tabla de verdad, diagrama fasorial y diagrama de constelación QPSK.

Donde $g(t)$ es la forma del pulso y $\theta_m = 2\pi(m-1)/M$ son las M posibles fases de la portadora que contienen la información transmitida.

PSK cuaternaria (QPSK)

La transmisión por desplazamiento de fase en cuadratura, en inglés *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*, o PSK cuaternaria, como a veces se le llama, es otra forma de modulación digital, de modulación angular de amplitud constante.

El sistema 4PSK o QPSK es una técnica de modulación con una codificación Q que se refiere a *Quaternaria*, o sea de cuatro niveles, $M = 4$, lo que indica cuatro fases de salida para una sola frecuencia portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Luego la fase de la señal portadora puede tomar secuencialmente cuatro valores posibles separados entre sí por un ángulo definido por:

$$\theta_m = 2\pi(m-1)/4 = \pi(m-1)/2 \text{ desde } m = 1 \text{ a } m = 4$$

Se necesitan 2 bits en la entrada del modulador para producir cuatro posibles condiciones, 00, 01, 10 y 11, a la salida los datos de entrada se combinan en grupos de 2 bits llamados *dibits*; cada código *dibit* genera cuatro fases de entrada.

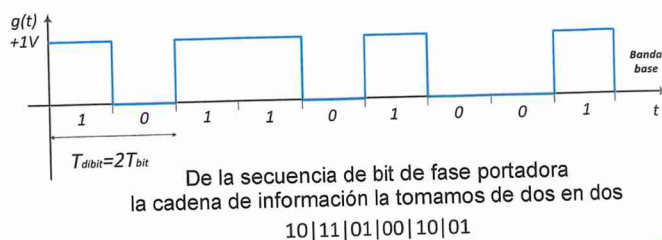


Figura 2.70. Representación de los dibits.

Cada *dibit* de 2 bits introducidos al modulador ocasiona un solo cambio de salida; así que la razón de cambio de salida (razón de baudio) es la mitad de la razón *dibits* de entrada. Eficiencia espectral: (filtro en coseno alzado) $e_F = \frac{2}{1+r}$.

Transmisor QPSK

En la Figura 2.72 se muestra un diagrama a bloques de un modulador de QPSK. Dos bits (un *dibit*) se introducen al derivador de bits. Después que ambos bits han sido introducidos, en serie, salen simultáneamente en paralelo. Un bit se dirige al canal *I* y el otro al canal *Q*. El bit *I* modula una portadora que está en fase con el oscilador de referencia, en este caso de $\text{sen}(\omega_c t)$ (de ahí el nombre de *I* para el canal en fase), y el bit *Q* modula una portadora que está 90° fuera de fase o en cuadratura con la portadora de referencia, en este caso de $\text{cos}(\omega_c t)$ (de ahí el nombre de *Q* para el canal de cuadratura).

En este caso, el modulador QPSK son dos moduladores BPSK combinados en paralelo.

$$Y_{QPSK}(t) = S_{QPSK}(t) = I \cdot \text{sen}(\omega_c t) + Q \cdot \text{cos}(\omega_c t)$$

De esta manera, se obtienen las siguientes posibles señales, de acuerdo al código PCM de 2 bits ingresado:

Código PCM	Señales resultantes	Señal QPSK
0 0	$-\text{sen}(\omega_c t) - \text{cos}(\omega_c t)$	$\text{sen}(\omega_c t - 135^\circ)$
0 1	$-\text{sen}(\omega_c t) + \text{cos}(\omega_c t)$	$\text{sen}(\omega_c t + 135^\circ)$
1 0	$\text{sen}(\omega_c t) - \text{cos}(\omega_c t)$	$\text{sen}(\omega_c t - 45^\circ)$
1 1	$\text{sen}(\omega_c t) + \text{cos}(\omega_c t)$	$\text{sen}(\omega_c t + 45^\circ)$

Cabe resaltar que dichos resultados han sido obtenidos utilizando un oscilador (TCXO) equivalente a una señal cosenoidal desfasada 180° y un desfasador de $+90^\circ$. Si se utilizara otro oscilador y otro tipo de desfasador, los resultados varían.

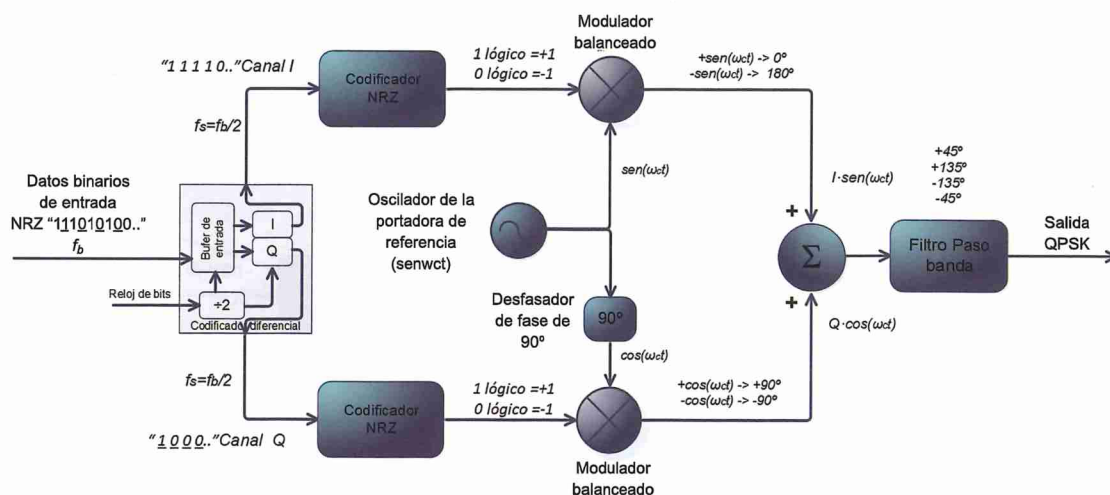


Figura 2.72. Transmisor QPSK.

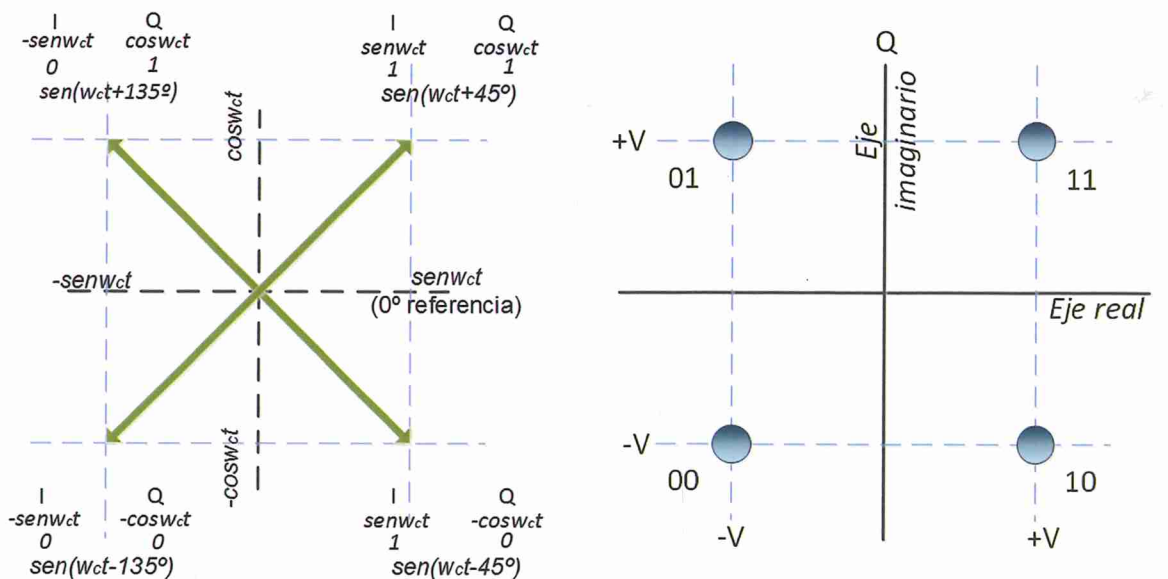


Figura 2.73. Diagrama fasorial y diagrama de constelación del transmisor QPSK.

Consideraciones de ancho de banda para el QPSK

Con QPSK, ya que los datos de entrada se dividen en 2 canales, la tasa de bits en el canal I , o en el canal Q es igual a la mitad de la tasa de datos de entrada ($f_b/2$) (En esencia, el derivador de bits estira los bits, I y Q , al doble de su longitud de bits de entrada). En consecuencia, la frecuencia fundamental más alta presente en la entrada de datos al modulador balanceado, I o Q , es igual a un cuarto de la tasa de datos de entrada (la mitad de $f_b/2 = f_b/4$). Como resultado, la salida de los moduladores balanceados, I y Q , requiere de un mínimo ancho de banda de Nyquist de doble lado, igual a la mitad de la tasa de bits que están entrando ($f_N = \text{doble } f_b/4 = f_b/2$). Por tanto, con QPSK, se realiza una compresión de ancho de banda (el ancho de banda mínimo es menor a la tasa de bits que están entrando).

Receptor de QPSK

El diagrama a bloques de un receptor QPSK se muestra en la Figura 2.74.

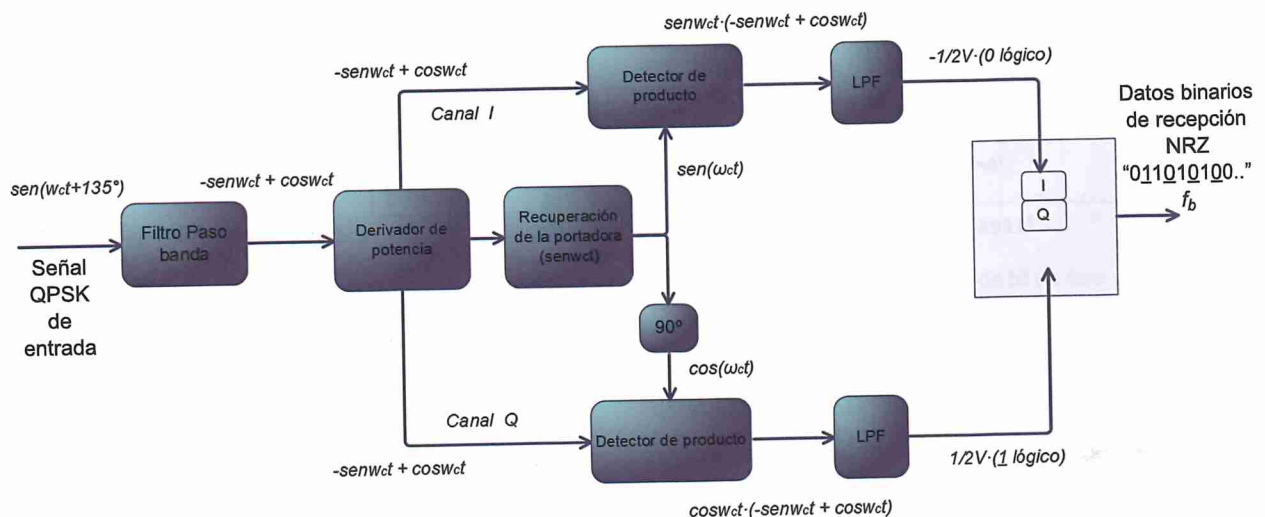


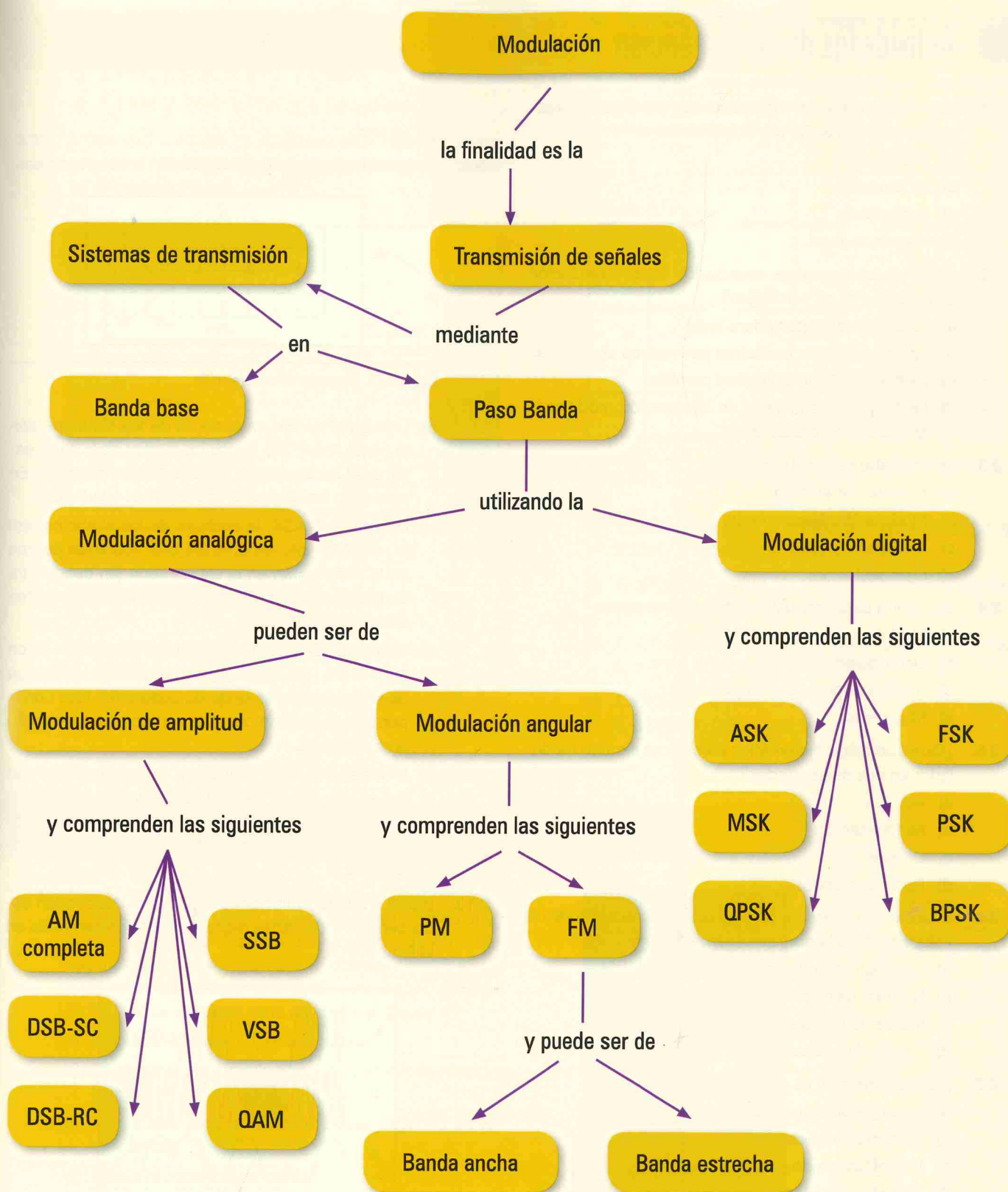
Figura 2.74. Receptor QPSK.

El derivador de potencia dirige la señal QPSK de entrada a los detectores de producto, I y Q , y al circuito de recuperación de la portadora. El circuito de recuperación de la portadora reproduce la señal original del modulador de la portadora de transmisión. La portadora recuperada tiene que ser coherente, en frecuencia y fase, con la portadora de referencia transmisora. La señal QPSK se demodula en los detectores de producto, I y Q , que generan los bits de datos, I y Q , originales. Las salidas de los detectores de productos alimentan al circuito para combinar bits, donde se convierten de canales de datos, I y Q , paralelos a un solo flujo de datos de salida binarios.

Actividad propuesta

2.15. En dos señales QPSK y BPSK con el mismo ancho de banda en el lóbulo principal del espectro, las señales moduladas respectivas en banda base:

- Tienen la misma velocidad de transmisión v_t .
- La señal correspondiente a la QPSK tiene doble v_t .
- La señal correspondiente a la BPSK tiene doble v_t .



Actividades de comprobación

- 2.1. Hacer que una señal modulante cambie alguna característica de una señal portadora se llama:
- Multiplexión.
 - Modulación.
 - Duplexión.
 - Mezclado lineal.
- 2.2. ¿Cuál de los siguientes enunciados sobre modulación de amplitud no es verdadero?
- La amplitud de portadora varía.
 - La frecuencia de portadora permanece constante.
 - La frecuencia de portadora cambia.
 - La amplitud de la señal de información modifica la amplitud de portadora.
- 2.3. Lo contrario de modulación es:
- Modulación inversa.
 - Modulación descendente.
 - Modulación nula.
 - Demodulación.
- 2.4. El circuito para producir modulación se llama:
- Modulador.
 - Demodulador.
 - Amplificador de ganancia variable.
 - Multiplexor.
- 2.5. ¿Qué operación matemática efectúa un circuito modulador en sus dos entradas?
- Adición.
 - Multiplicación.
 - División.
 - Raíz cuadrada.
- 2.6. El cociente del voltaje pico de la señal moduladora y el voltaje pico de la portadora se denomina:
- Relación de voltajes.
 - Número de decibels.
 - Índice de modulación.
 - Factor de mezcla.
- 2.7. ¿Qué ocurre si m es mayor que 1?
- Una operación normal.
 - La portadora desciende a cero.
 - La frecuencia de portadora cambia.
 - La señal moduladora se distorsiona.
- 2.8. La señal de AM con una frecuencia máxima de la señal moduladora de 4,5 kHz tiene un ancho de banda total de:
- 4,5 kHz.
 - 6,75 kHz.

- 9 kHz.
- 18 kHz.

- 2.9. El siguiente diagrama de constelación corresponde con:

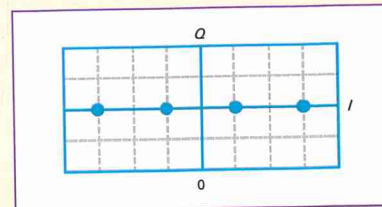


Figura 2.75. Diagrama de constelación.

- Una señal 4-ASK, la anchura de los símbolos son $m_q \in \{0, A, 2A, 3A\}$. Todos los puntos de la señal están en el eje de coseno (en fase con la portadora). En este caso las componentes están en cuadratura.
- Una señal 6-ASK, la anchura de los símbolos son $m_q \in \{-3A, -2A, -A, 0, A, 2A, 3A\}$. Todos los puntos de la señal están en el eje de seno (en cuadratura con la portadora). En este caso las componentes están en cuadratura.
- Una señal 6-ASK, la anchura de los símbolos son $m_q \in \{-3A, -2A, -A, 0, A, 2A, 3A\}$. Todos los puntos de la señal están en el eje de coseno (en fase con la portadora). En este caso las componentes no están en cuadratura.
- Una señal 4-ASK, la anchura de los símbolos son $m_q \in \{-3A, -A, A, 3A\}$. Todos los puntos de la señal están en el eje de coseno (en fase con la portadora). En este caso las componentes no están en cuadratura.

- 2.10. Indica a qué modulaciones digitales corresponden estas señales moduladas digitalmente, representadas en la Figura 2.76.

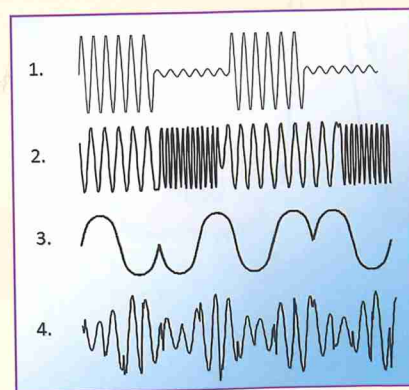


Figura 2.76. Señales moduladas digitalmente.

- a) 1. QAM, 2. FSK, 3. PSK, y 4. PAM.
- b) 1. FSK, 2. PSK, 3. PAM, y 4. QAM.
- c) 1. PSK, 2. FSK, 3. PAM, y 4. QAM.
- d) 1. PAM, 2. FSK, 3. PSK, y 4. QAM.

2.11. Indica qué cambios se producen en la representación fasorial en un diagrama de constelación representado en la Figura 2.77.

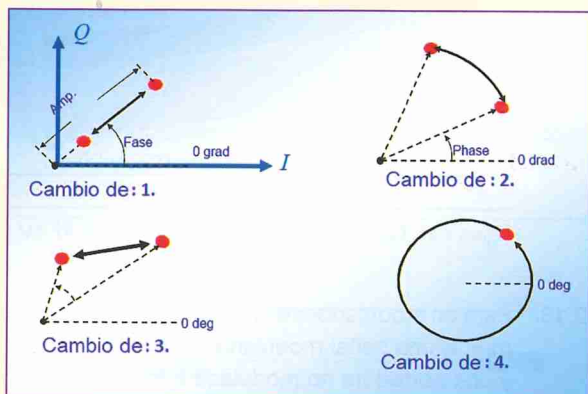


Figura 2.77. Cambios de representación fasorial.

- a) 1. Amplitud, 2. Frecuencia, 3. Amplitud y fase, y 4. Fase.
- b) 1. Fase, 2. Amplitud, 3. Amplitud y fase, y 4. Frecuencia.
- c) 1. Amplitud, 2. Fase, 3. Frecuencia, y 4. Amplitud y fase.

- d) 1. Amplitud, 2. Fase, 3. Amplitud y fase, y 4. Frecuencia.

2.12. Indica a qué constelaciones corresponden los siguientes diagramas de los 8 sistemas de radiocomunicaciones representados en la Figura 2.78.

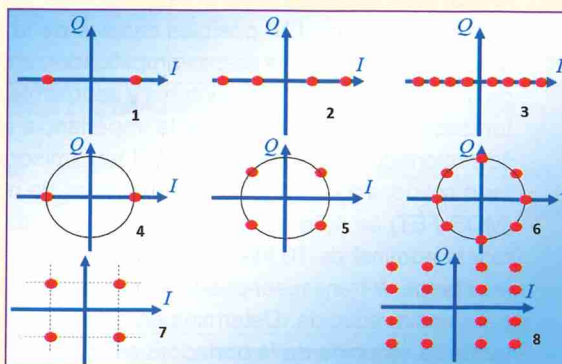


Figura 2.78. Diagramas de constelaciones.

- a) 1. BPSK, 2. 4 PAM, 3. 8 PAM, 4. 2 PAM, 5. QPSK, 6. 8 PSK, 7. 4 QAM y 8. 16 QAM.
- b) 1. 2 PAM, 2. 4 PAM, 3. 8 PAM, 4. 4 QAM, 5. QPSK, 6. 8 PSK, 7. BPSK y 8. 16 QAM.
- c) 1. 2 PAM, 2. 4 PAM, 3. 8 PAM, 4. BPSK, 5. QPSK, 6. 8 PSK, 7. 4 QAM y 8. 16 QAM.
- d) 1. BPSK, 2. 4 PAM, 3. 8 PAM, 4. 2 PAM, 5. 4 QAM, 6. 8 PSK, 7. QPSK y 8. 16 QAM.

Actividades de aplicación

2.13. Si tenemos un transmisor de radiocomunicaciones con modulador de AM DSBFC que dispone en entrada una portadora de 800 kHz con una amplitud de 40 V, la segunda entrada es una señal modulante de 25 kHz, cuya amplitud es suficiente para producir un cambio de 10 V en la amplitud de la envolvente. Determina:

- a) Frecuencia lateral superior e inferior.
- b) Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación.
- c) Amplitudes pico positivas máxima y mínima de la envolvente.
- d) Dibuja el espectro de salida.
- e) Traza la envolvente (señala todos los voltajes pertinentes).

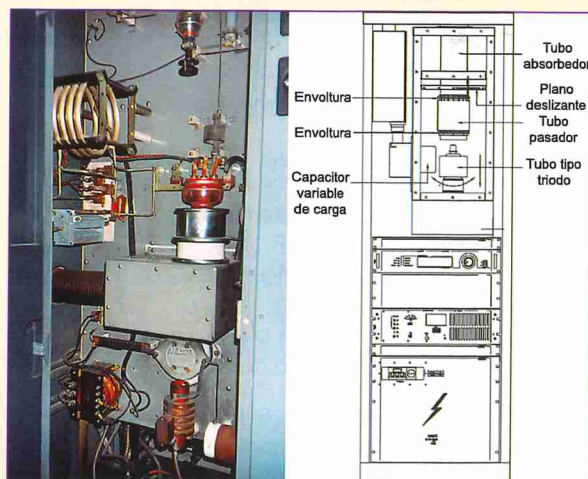


Figura 2.79. Amplificador de potencia de un transmisor de AM.

- 2.14.** El transmisor VIMESA HJ 10 AGIL (cuya hoja de producto está en los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es) está diseñado para proporcionar de una forma rápida el restablecimiento del servicio de difusión en AM en caso de emergencia. El transmisor cubre toda la banda de onda media (527 kHz a 1606 kHz) en pasos preestablecidos de 9 kHz, hasta alcanzar los 120 posibles canales de la banda. Mediante el empleo de etapas amplificadoras de banda ancha y de circuitos de sintonía y acoplamiento sintonizables, es posible adaptar la impedancia al canal seleccionado en menos de 30 s. El transmisor, de estado sólido, está compuesto por 8 etapas de potencia (MOS-FET) de 1,25 kW, cuya combinación da la potencia nominal de 10 kW. En caso de fallo de una de las etapas, el transmisor puede continuar funcionando, a potencia reducida. Determina en este caso con una potencia reducida de la portadora a $P_c = 1000$ W y un coeficiente de modulación de $m = 0,2$:



Figura 2.80. Transmisor de AM completa.

- a) Potencia de la banda lateral.
b) Potencia total transmitida.
- 2.15.** ¿Cuál es la desventaja que predomina en la transmisión DSBFC o AM completa?
- 2.16.** Diseña un modulador de doble banda lateral utilizando entre otros elementos un elemento no lineal cuya función característica de entrada/salida es:

$$v_{out}(t) = a_1 \cdot v_{in}(t) + a_3 \cdot v_{in}^3(t)$$

Y como entrada al sistema, toma:

$$v_{in}(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t) + x(t)$$

¿Qué condición debe cumplir la frecuencia portadora en términos del ancho de banda del mensaje W ?

- 2.17.** Se dispone de un generador y analizador de señales de RF 1 GHz y modulación AM, FM, PM. Determina la desviación de frecuencia pico (Δf) y el índice de modulación (β) cuando se usa como modulador de FM con una sensibilidad de desviación de frecuencia $K_{FM} = 5$ kHz/V y una señal modulante $v_m(t) = 2$

$\cos(2\pi 2000t)$. Igualmente, determina la desviación de fase pico (m) cuando se usa como modulador de PM con una sensibilidad de desviación de fase $K_{pm} = 2,5$ rad/V y una señal modulante $v_m(t) = 2 \cos(2\pi 2000t)$



Figura 2.81. Generador y analizador de señales de RF AM y PM.

- 2.18.** Para un modulador de FM con un índice de modulación $m = 1$, una señal modulante $v_m(t) = V_m \sin(2\pi 1000t)$, y una portadora no modulada $v_c(t) = 10 \sin(2\pi 5 \cdot 10^5 t)$, determina:
- a) El número de conjuntos de frecuencias laterales significativas.
b) Sus amplitudes.
c) Dibuja el espectro de frecuencia mostrando sus amplitudes relativas.
- 2.19.** Dibuja la forma de onda resultante al transmitir la secuencia 10010111 para cada una de las siguientes técnicas de modulación. Supón en los casos A, C y D que la frecuencia de modulación es igual a la frecuencia de la portadora.
- a) Con modulación ASK de dos estados, suponer $A(0) = 0$.

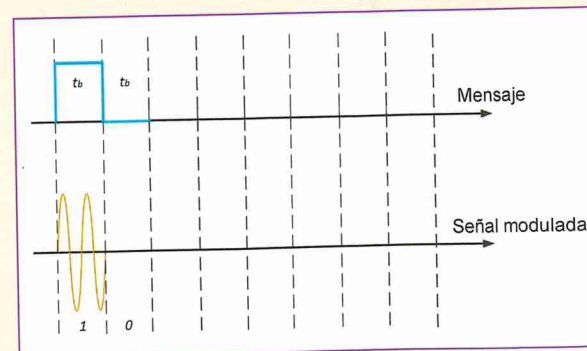


Figura 2.82. Forma de onda de la señal modulada en ASK.

- b) Con modulación FSK de dos estados, suponer $f(1) = 2 \cdot f(0)$.

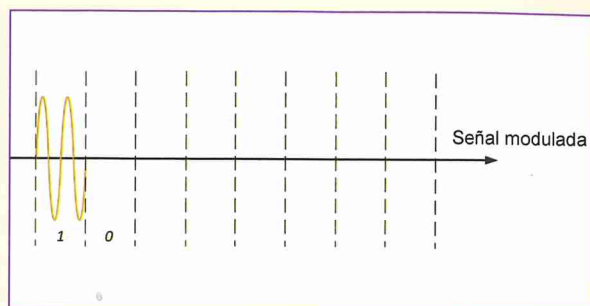


Figura 2.83. Forma de onda de la señal modulada en FSK.

- c) Con modulación BPSK de dos estados, con fases de 90 y 270 grados.

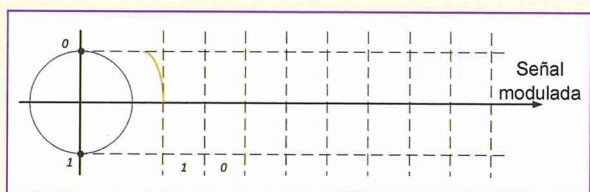


Figura 2.84. Forma de onda de la señal modulada en BPSK.

- d) Con modulación PSK de cuatro estados, con las fases y dos bits.

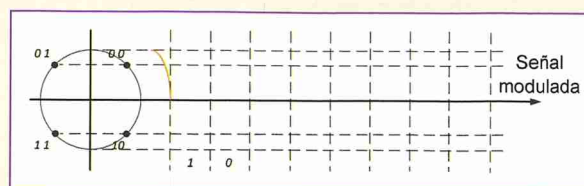


Figura 2.85. Forma de onda de la señal modulada en QPSK.

- e) Con modulación PSK de ocho estados, con las fases y 3 bits (añadir un 1 al final de la secuencia original).

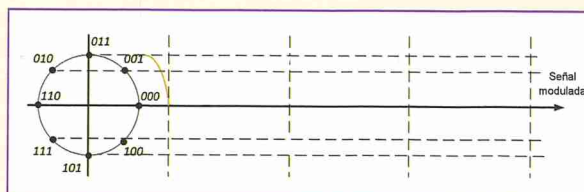


Figura 2.86. Forma de onda de la señal modulada en 8-PSK.

Actividades de ampliación

- 2.20. Explica las características e identifica los parámetros técnicos que has conocido en esta unidad, del transmisor de 11 kW AM de Vimesa, cuya hoja de producto se incorpora en los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es.

- 2.21. Analiza la propuesta de adquisición e instalación de transmisor de AM para el centro emisor de radio nacional de España en Tenerife. Pliego de condiciones técnicas. Características técnicas. en los recursos digitales disponibles en www.paraninfo.es.

- 2.22. Diseña un modulador de AM completa utilizando entre otros elementos un elemento no lineal cuya función característica de entrada/salida es:

$$x_{out}(t) = a_1 \cdot x_{in}(t) + a_2 \cdot x_{in}^2(t)$$

Y como entrada al sistema, toma:

$$x_{in}(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t) + x(t)$$

¿Qué condición debe cumplir la frecuencia portadora en términos del ancho de banda del mensaje W ?

- 2.23. Observa el siguiente sistema.

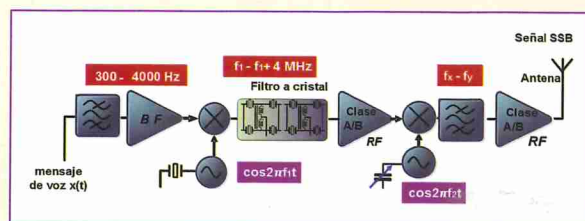


Figura 2.87. Sistema transmisor de SSB

Se tiene un mensaje de voz $x(t)$, ajustado a la banda de frecuencias entre 300 Hz y 4 kHz que se desea modular en Single Side Band (SSB). En el sistema mostrado se elige $f_1 = 10$ kHz y $f_2 = 100$ kHz.

- a) Dibuja los espectros en cada etapa del sistema (salidas de mezcladores y filtros).
- b) Determina los valores que pueden tomar f_x y f_y para que la salida sea una señal en banda lateral inferior (LSSB).

2.24. Una señal FM tiene una desviación de frecuencia de 3 kHz y una frecuencia moduladora de 1 kHz. Su potencia total P_T es de 5 W, desarrollada a través de una carga resistiva de 50 ohms. La frecuencia portadora es de 160 MHz.

- Calcula el voltaje de señal RMS V_T .
- Calcula el voltaje RMS a la frecuencia de la portadora y cada uno de los tres primeros pares de bandas laterales.
- Para los primeros tres pares de bandas laterales, calcula la frecuencia de cada banda lateral.
- Calcula la potencia a la frecuencia de la portadora y a cada una de las frecuencias de bandas laterales determinadas en el punto anterior.
- Determina qué porcentaje de la potencia de señal total representan los componentes descritos antes.
- Traza la señal en el dominio de la frecuencia, como se vería en el analizador de espectro. La escala vertical debe ser la potencia en dBm y la escala horizontal la frecuencia.

2.25. Se ha intentado desarrollar un modulador capaz de llevar a cabo la mayor parte de las modulaciones estudiadas (tanto analógicas como digitales) desarrolladas durante el curso. El resultado se muestra en la Figura 2.88.

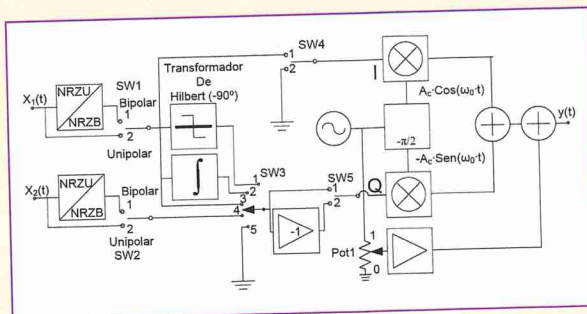


Figura 2.88. Modulador válido para modulaciones tanto analógicas como digitales.

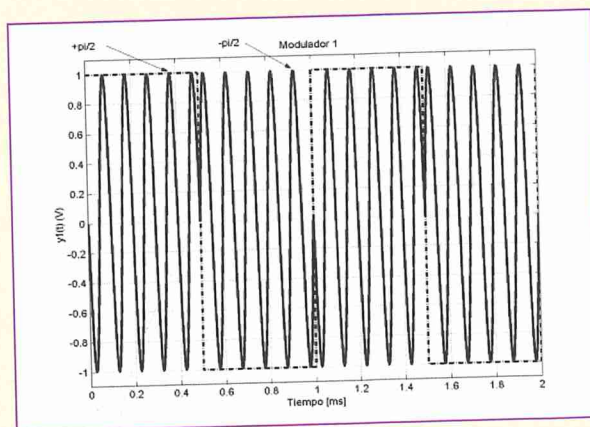


Figura 2.89. Señal $y_1(t)$ del modulador.

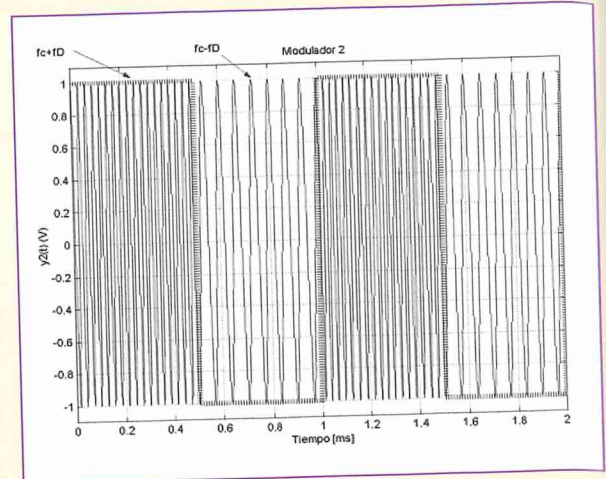


Figura 2.90. Señal $y_2(t)$ del modulador.

- Supón que las señales $x_1(t)$ y $x_2(t)$ (esta última en el caso que sea necesaria) son señales digitales binarias unipolares (0 V - 1 V) que se convierten en el primer bloque a bipolares (± 1 V), eligiéndolas según convenga. Elabora una tabla en la que se describan las diferentes posiciones en las que se han de colocar los distintos conmutadores para obtener las modulaciones ASK (de dos formas diferentes), BPSK (de dos formas diferentes), FSK y QPSK. Indica también si el potenciómetro deberá ajustarse a la posición 0 o en otro valor distinto. (Nota: No tenga en cuenta la existencia de la limitación que se describe en el apartado b para contestar este apartado.)
- El diagrama de bloques de la Figura 2.88, presenta con las modulaciones angulares digitales el mismo problema que con las angulares analógicas. Identifica cuál es el problema y propón un diagrama de bloques que lo solucione.
- Supón que el modulador tiene una señal portadora de 1 MHz, que la señal digital $x_1(t)$ toma valores de ± 1 V, que el conjunto de la Figura 2.88 se configura como modulador Armstrong, y que se desea obtener una señal BPSK a 100 MHz. Calcula la constante del modulador Armstrong (K_p en radianes/voltio) cuando el paso a la frecuencia final se alcance por multiplicación directa, sin traslación de frecuencias.
- Se pretende obtener una señal con la modulación de la Figura 2.89, pero por error se obtiene en la salida la de la Figura 2.90, ¿qué error se ha cometido? Justifica la respuesta.
- ¿Qué modulación analógica (de las estudiadas) no se podría conseguir con el modulador de la Figura 2.88? ¿Qué modificación sugieres para poderla realizar?

β	Orden					
	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	Pot1
ASK-1						
ASK-2						
BPSK-1						
BPSK-2						
FSK						
QPSK						

2.26. Se dispone de un canal digital por el que se ha de transportar una señal analógica. La señal tomará

valores entre ± 1 V y tendrá un ancho de banda limitado a 4 kHz. Se muestrearán con la frecuencia de muestreo mínima y con el número de bits suficientes para distinguir niveles que disten menos de 2 mV entre sí. El canal tendrá una frecuencia central de 1 MHz y un ancho de banda de 20 kHz.

- Calcula el menor ancho de banda del canal paso bajo que habrá de llevar el flujo binario en banda base hasta el modulador.
- Justifica el sistema de modulación que se ha de elegir para cumplir los requisitos del enunciado.
- Dibuja los diagramas de bloques del transmisor y del receptor.
- Dibuja la constelación de la modulación elegida.
- ¿Qué sistema de modulación se habría de elegir si el canal fuese no lineal y no se pudiese cambiar el ancho de banda? Razone las ventajas y los inconvenientes que presentaría dicha modulación.



Prácticas profesionales

El guion para realizar esta práctica lo encontrarás entre los recursos digitales del libro, disponibles en www.paraninfo.es, mediante un sencillo registro desde la sección de «Recursos previo registro» de la ficha web de la obra .

2.1. Identifica la modulación analógica AM en los sistemas de radiocomunicaciones con los entrenadores de comunicaciones de Promax.

2.2. Identifica la modulación analógica FM en los sistemas de radiocomunicaciones con los entrenadores de comunicaciones de Promax.

2.3. Identifica la conversión A/D y D/A. Muestreo y cuantificación en los sistemas de radiocomunicaciones con los entrenadores de comunicaciones de Promax.

2.4. Identifica la modulación y demodulación en ASK con los entrenadores de comunicaciones digitales de Promax.

2.5. Identifica la modulación en FSK. Demodulación por filtros duales (DFD, Dual Filter Detector) con los entrenadores de comunicaciones digitales de Promax.

2.6. Identifica la modulación y demodulación en BPSK con los entrenadores de comunicaciones digitales de Promax.