

MODULACIÓN CW (CONSTINUOS WAVE = ONDA CONTINUA)

Se aplica en general a sistemas analógicos como se presenta en la figura:

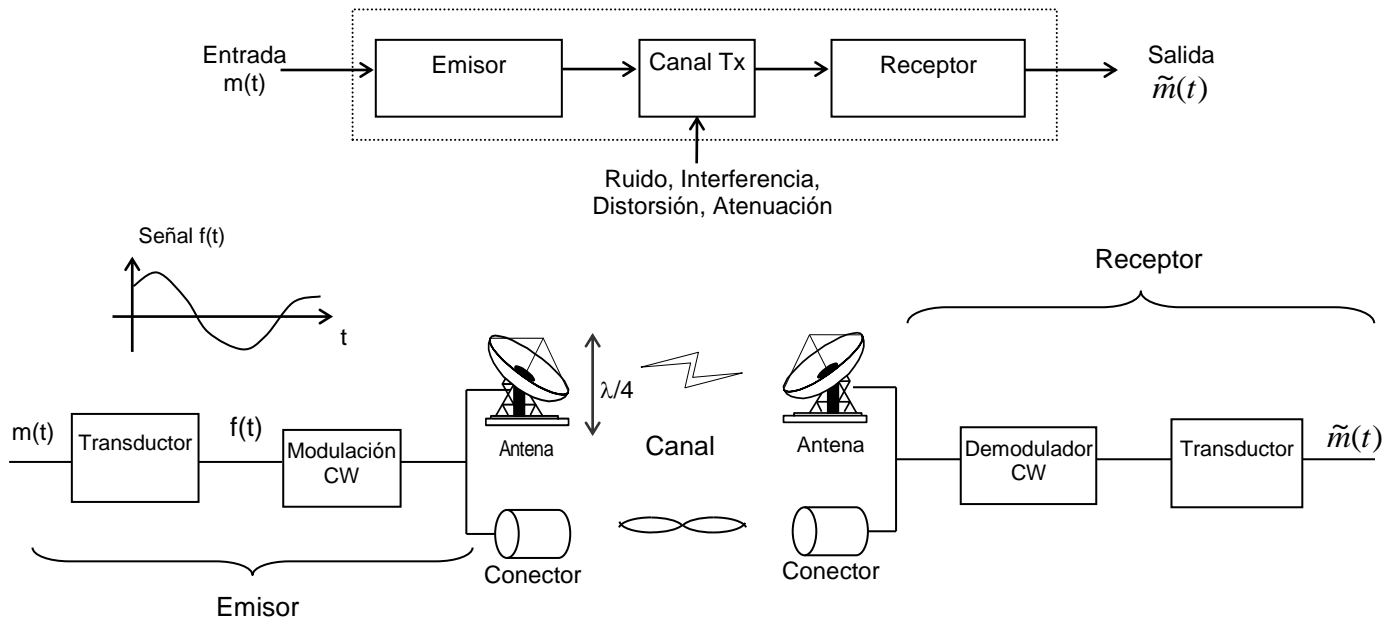


Figura 1 Sistema de comunicación analógico

Necesidad de la modulación:

Desde el desarrollo de la antena por H. Hertz a mediados del S. XIX varios fueron los intentos por transmitir información en base a las predicciones de Maxwell según el cual los voltajes y corrientes de las líneas de Tx podían traducirse a ondas electromagnéticas OEM. En realidad las dimensiones de las antenas debían ser del orden de la longitud de onda aprox. $\lambda/4$:

Ejemplo 1: Estime las dimensiones de las antenas para transmitir señales de 1 KHz y 1 MHz.

Solución:

Para 1 KHz: $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10^3} = 300 \text{ Km} \rightarrow \frac{\lambda}{4} = 75 \text{ Km}$ tamaño aprox. de la antena

Para 1 MHz: $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10^6} = 300 \text{ m} \rightarrow \frac{\lambda}{4} = 75 \text{ m}$ tamaño más razonable de antena

Cuando G. Marconi inventó la radiocomunicación a fines del S.XIX, enviando las 1ras señales radio telegráficas usando tonos de alta frecuencia sentó las bases de la modulación analógica y digital.

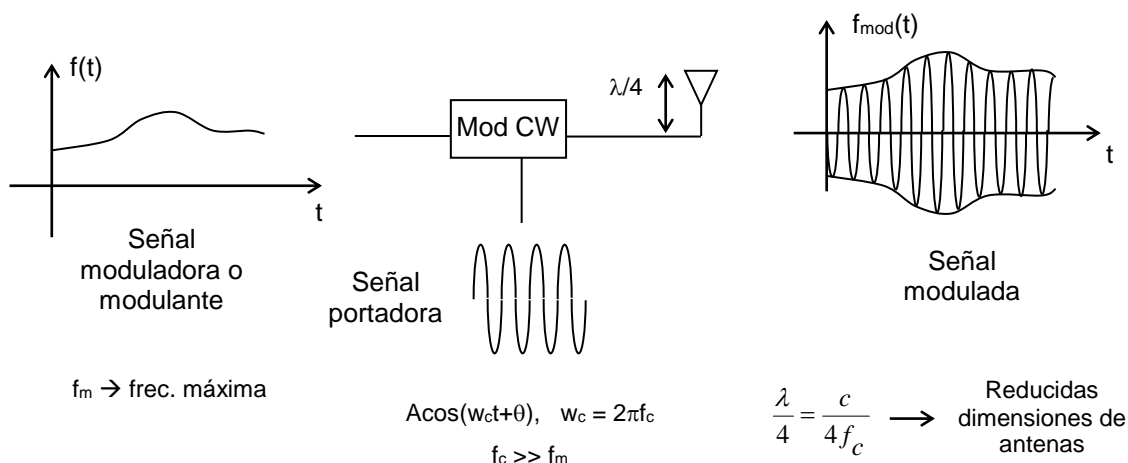


Figura 2 Modulación CW

La modulación analógica o de onda continua se caracteriza por la variación de algún parámetro de una portadora senoidal de alta frecuencia $f_c(t)=A\cos(\omega_c t+\theta)$ en función de la señal mensaje $f(t)$. Debido a la alta frecuencia de la señal portadora es posible la transmisión por radiofrecuencia (RF) del mensaje $f(t)$.

Hay 3 tipos principales de modulación CW: AM, FM y PM.

Modulación AM:

La amplitud de la portadora es modulada por $f(t)$

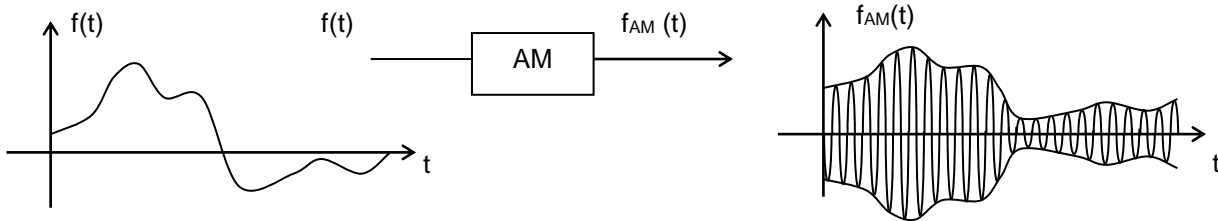


Figura 3 Modulación AM

Forma de onda: $f_{AM}(t)=A(t)\cos(\omega_c t+\theta)$ donde: $A(t) = \alpha + \beta f(t)$, α, β ctes

Modulación FM:

La frecuencia de la portadora es modulada por $f(t)$

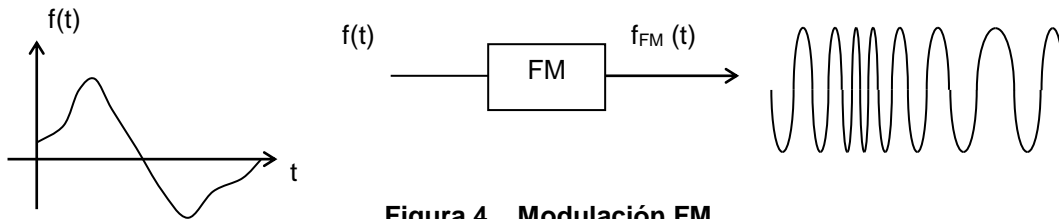


Figura 4 Modulación FM

Forma de onda: $f_{FM}(t)=A\cos(\omega_c(t).t+\theta)$ donde: $\omega_c(t) = \alpha + \beta f(t)$, α, β ctes

Modulación PM:

La fase de la portadora es modulada por $f(t)$

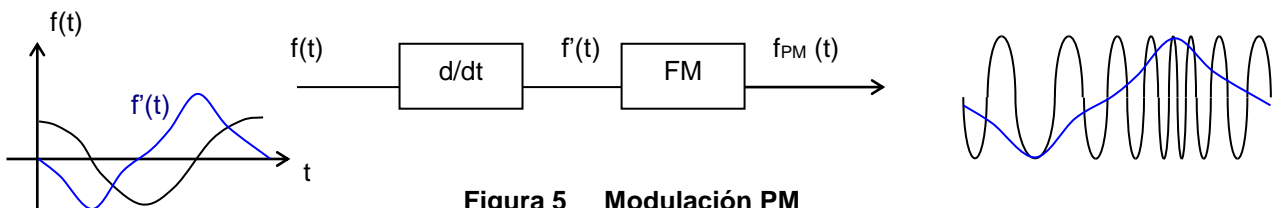


Figura 5 Modulación PM

Forma de onda: $f_{PM}(t)=A\cos(\omega_c t+\theta(t))$ donde: $\theta(t) = \alpha + \beta f(t)$, α, β ctes

Ejemplos de sistemas modulados:

- Los sistemas de radiodifusión:
 - AM comercial $f_c \rightarrow 535 - 1610$ KHz
 - FM estéreo $f_c \rightarrow 88 - 108$ MHz
 - TV VHF/UHF $f_c \rightarrow 54 - 88$ MHz, $174 - 216$ MHz / $470 - 806$ MHz
- Los sistemas de microondas: $f_c \rightarrow 1 - 20$ GHz
- Los sistemas de satélites: $f_c \rightarrow 2 - 30$ GHz
- Los 1ros sistemas móviles: $f_c \rightarrow > 800$ MHz

MODULACIÓN EN AMPLITUD

Esta técnica de modulación fue la 1ra en desarrollarse a inicios del siglo XX. En ella la amplitud $A(t)$ de la portadora varía linealmente con la señal mensaje $f(t)$:

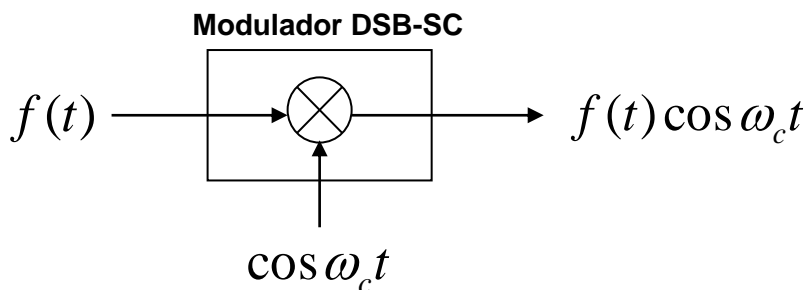
$$f_{mod}(t) = \varphi_c(t) = A(t) \cos \omega_c t$$

Dependiendo de la relación de los espectros de $f(t)$ y $A(t)$ se tienen los siguientes tipos de modulación:

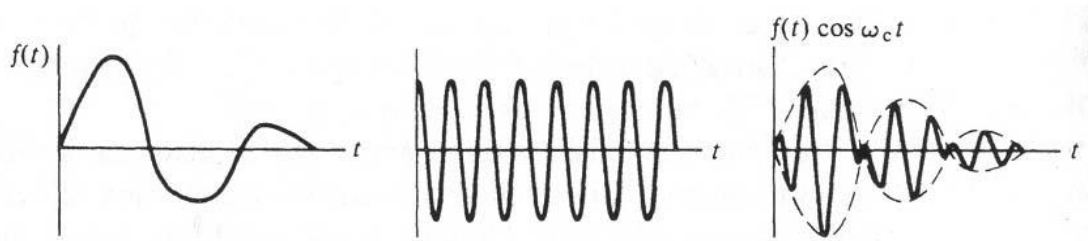
- Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida: DSB-SC (DBL-SP)
- Modulación en Amplitud: AM (DSB o DSB-LC)
- Banda Lateral Única: SSB (BLU)
- Banda Lateral Residual: VSB (BLR)

1. Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida (DSB-SC)

a. Generación DSB-SC: $\varphi_{DSB-SC}(t) = f(t) \cos \omega_c t$

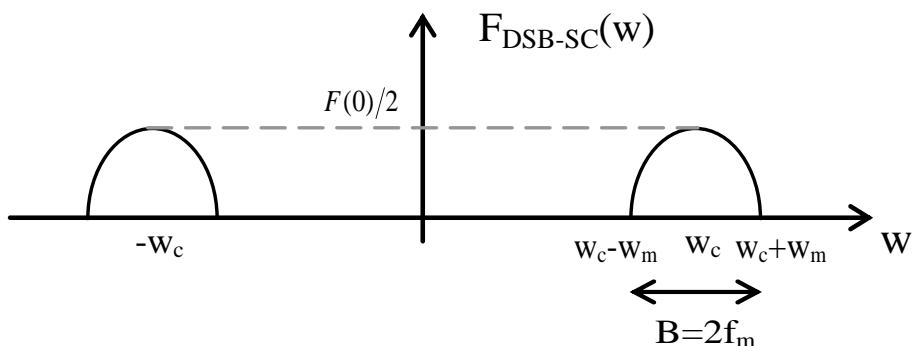


En la figura vemos como se realiza la modulación en DSB-SC



b. Espectro DSB-SC:

Utilizando el teorema de la modulación: $F_{DSB-SC}(\omega) = \frac{1}{2} [F(\omega + \omega_c) + F(\omega - \omega_c)]$



En las frecuencias positivas la porción del espectro a la derecha de ω_c se le conoce como la banda lateral superior USB (BLS) y la porción a la izquierda es la banda lateral inferior LSB (BLI). ¿Cómo se interpreta para las frecuencias negativas?

Este tipo de modulación por amplitud se llamada *portadora suprimida* pues en el espectro de la señal modulada no aparece el espectro de la señal portadora. Además se llama *doble banda lateral* pues se puede apreciar las dos porciones del espectro de la señal original en la zona de las frecuencias positivas.

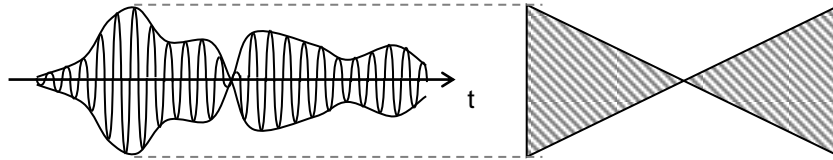
c. Parámetros:

Ancho de banda: $B_{tx} = 2f_m$ Hz

Potencia de Tx:

$$P_{tx} = \frac{\overline{f^2(t)}}{2}$$

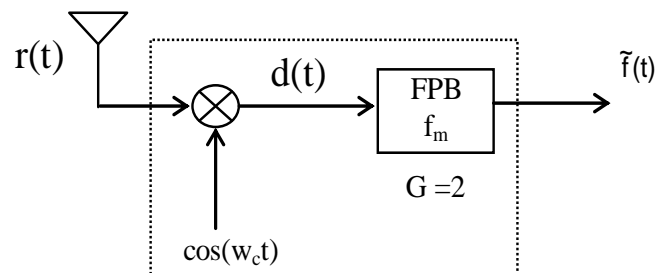
Patrón XY:



d. Detección síncrona:

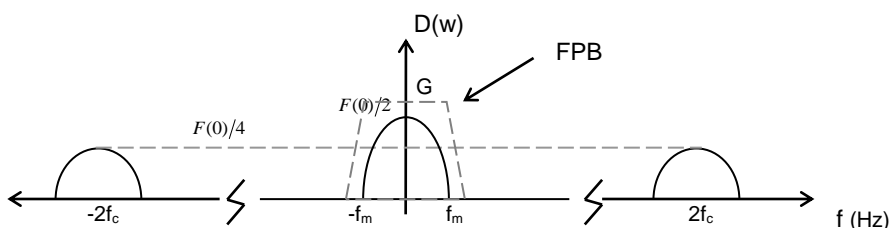
Asumiendo que no hay efectos del canal se tiene:

La señal de entrada al Rx: $r(t) = f(t) \cos w_c t$



La señal de predetección:

$$d(t) = r(t) \cos w_c t = f(t) \cos^2 w_c t = f(t) \frac{1 + \cos 2w_c t}{2} = \frac{f(t)}{2} + \frac{f(t)}{2} \cos 2w_c t$$



La ganancia del FPB compensa las pérdidas en el canal o la potencia de las portadoras locales en el Tx y Rx. La atenuación no produce pérdida de información.

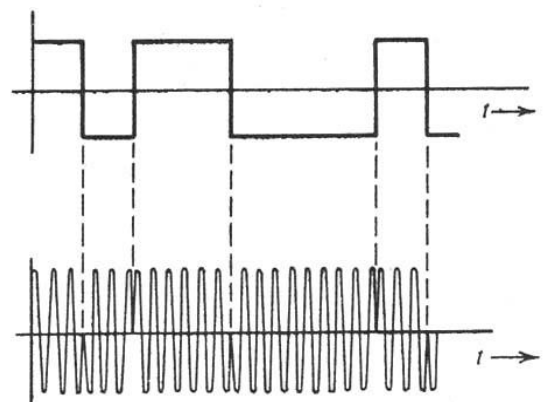
La salida demodulada: $\tilde{f}(t) = d(t)|_{FPB, G=2} = f(t)$

En la demodulación es difícil conseguir localmente $\cos(w_c t)$, unas de las formas es utilizando portadora piloto o mediante un lazo de sincronización de fase cerrada o PLL. Un error de fase θ_0 o una desviación en frecuencia $\Delta\omega$ con respecto a la frecuencia de portadora w_c del transmisor genera problemas en la demodulación.

En conclusión lo más apropiado es tener el transmisor y receptor en fase y en la misma frecuencia de portadora. Cuando se alcanza esta condición se tiene *detección síncrona* o *coherente*. Además si en el receptor se tiene un solo detector de este tipo, el receptor se denomina *homodino*.

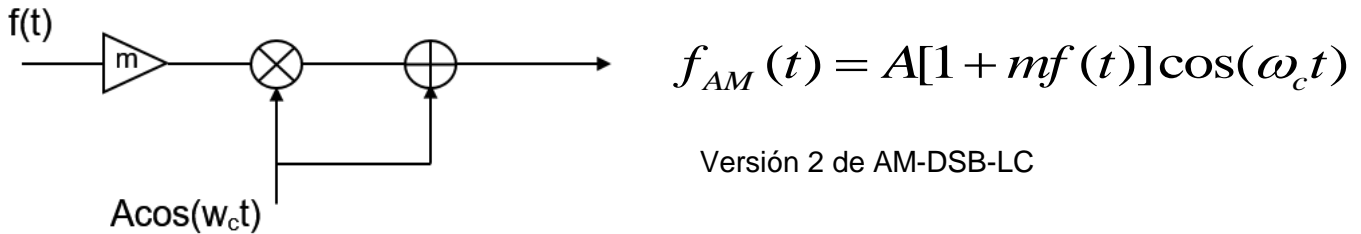
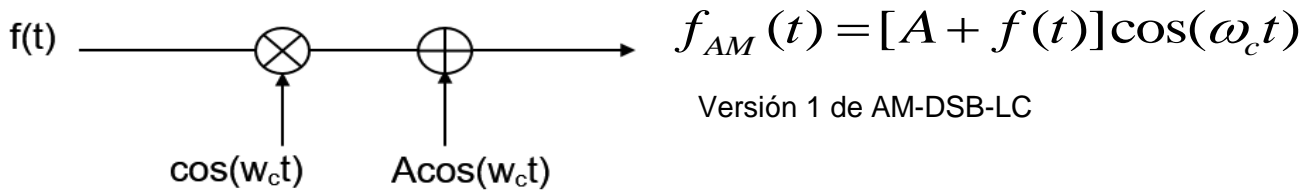
A continuación se muestra otro ejemplo de señal modulada en DSB-SC.

Problema 1: Sea $f(t) = a \cos \omega_m t$. Hallar la señal modulada en DSB-SC y dibujar la señal moduladora y la modulada en el dominio del tiempo y la frecuencia.

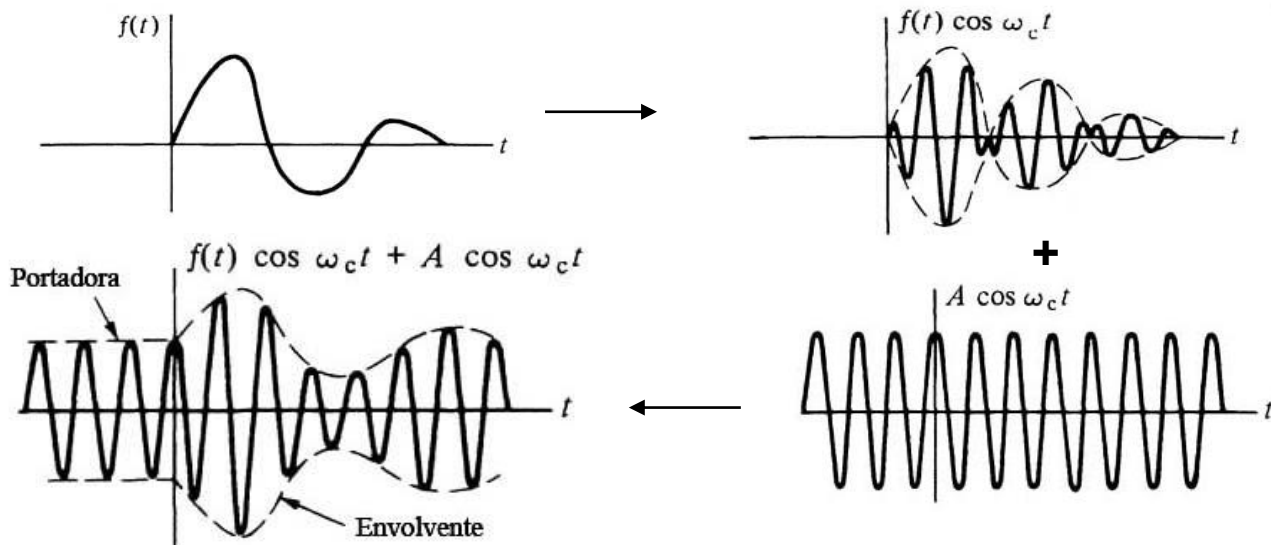


2. Doble Banda Lateral con Portadora Presente (DSB-LC)

a. **Generación AM-DSB:** Se muestran dos versiones de generación AM:

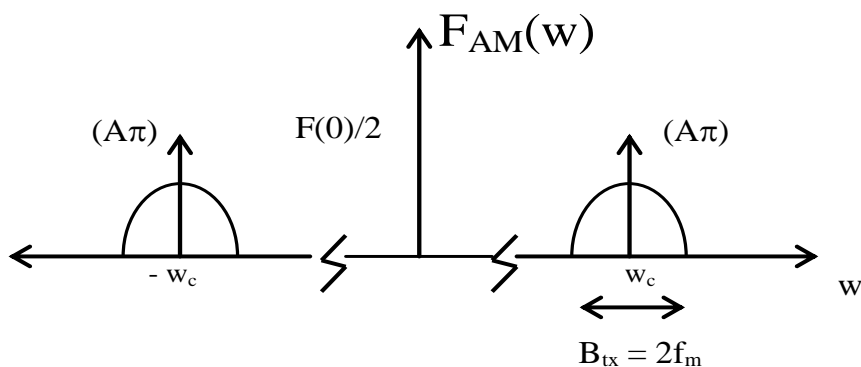


Se presentan las figuras del proceso de generación de la 1ra versión de AM:



b. **Espectro AM-DSB:** Utilizando el teorema de la modulación:

$$F_{AM}(\omega) = \frac{1}{2} [F(\omega + \omega_c) + F(\omega - \omega_c)] + \pi A [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)]$$



La inclusión de la portadora en la señal modulada implica que las frecuencias de la señal mensaje cercanas a $\omega=0$ pueden sufrir una ligera alteración al ser demoduladas. Sin embargo, en muchos casos dichas frecuencias no son utilizadas (como la voz) y por lo tanto no representan un error importante en la señal mensaje.

Debido a que esta forma de modulación es utilizada por las emisoras comerciales se le denomina Amplitud Modulada (AM).

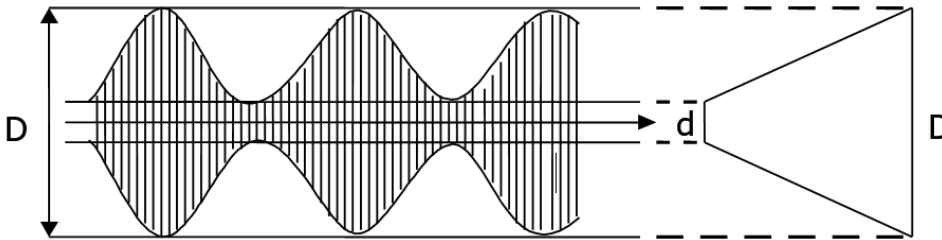
c. Índice de Modulación: Se define el grado de modulación de la portadora **como:**

$$im = \frac{|f_{\min}(t)|}{A}$$

Depende de A (version 1 de AM)

$$im = \frac{D-d}{D+d} = m \cdot |f_{\max}(t)| = m \cdot m_p$$

Independiente de A (version 2 de AM)

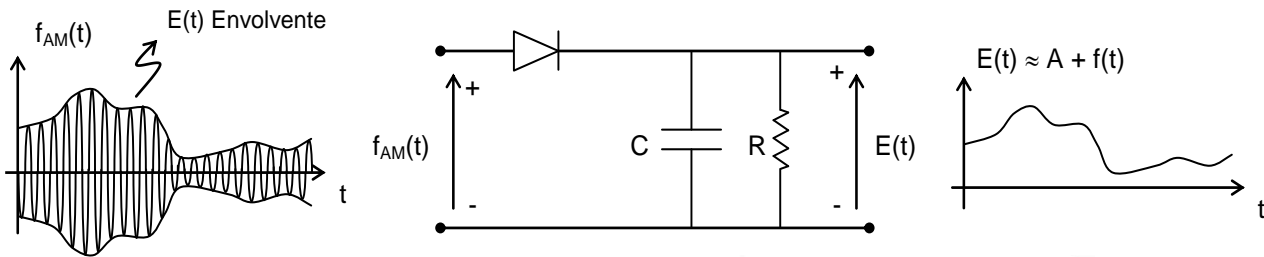


Patrón XY de
AM-DSB-LC

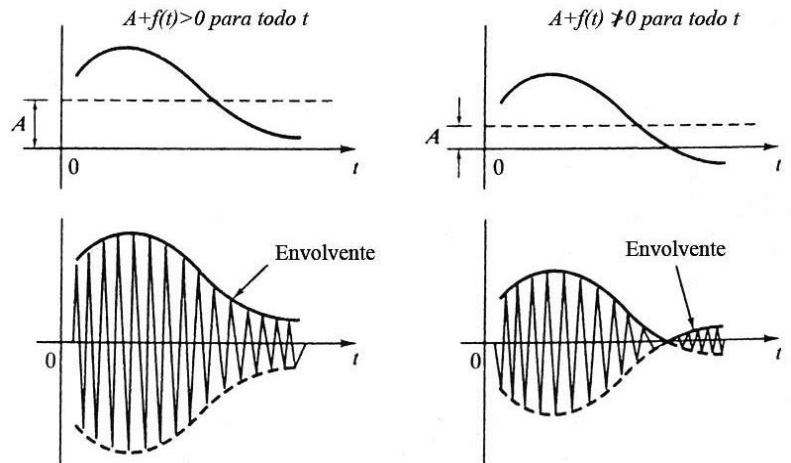
d. Detección de envoltente: La ventaja de AM sobre DSB-SC radica en la posibilidad de usar un esquema muy simple conocido como *detección de envoltente* (no coherente) que no requiere de referencia de reloj. La condición para demodular cualquier versión de AM utilizando detección de envoltente es:

$$im \leq 1$$

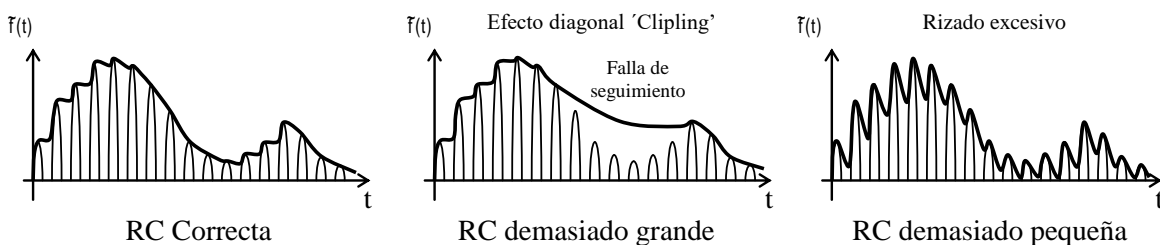
Si $im > 1$ se dice que la señal está sobremodulada. En este caso no se puede demodular utilizando detección por envoltente, sólo queda utilizar detección síncrona (coherente).



Si A es suficientemente grande, entonces la envoltente $[A+f(t)]$ será proporcional a $f(t)$ y la demodulación consiste sólo en detectar dicha envoltente. Si A no es un valor grande, la envoltente no es proporcional a $f(t)$. También puede haber problemas con el detector de envoltente como el efecto 'diagonal Clipping' y el problema de rizado excesivo.



Problemas de la detección por Envoltente



Para evitar el rizado excesivo y la falla de seguimiento se debe cumplir:

$$\frac{1}{f_c} \ll RC < \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{m}\right)^2 - 1}}{w_m}$$

e. Modulación de tono y patrón XY:

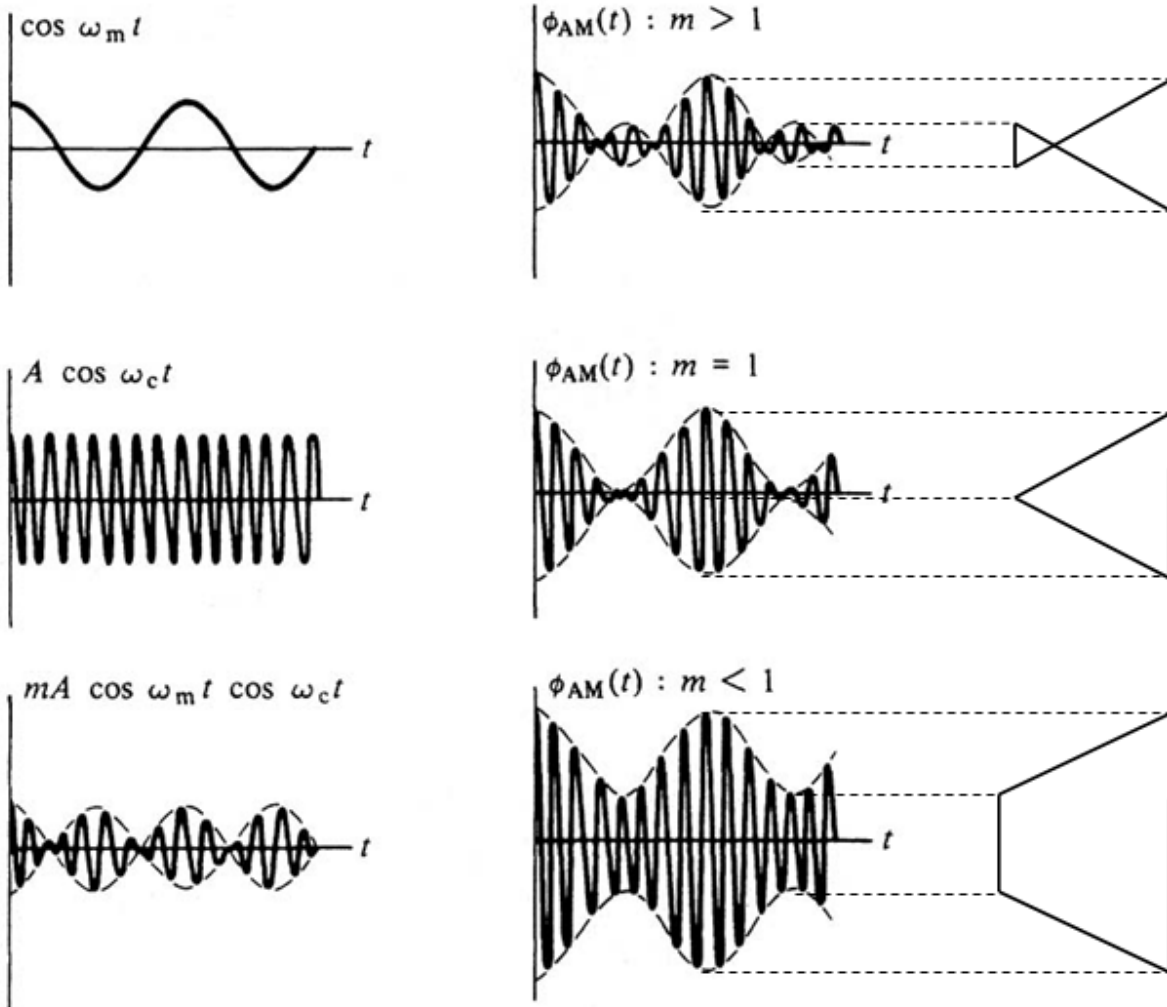
Si consideramos $f(t) = m_p \cos \omega_m t$ y la señal portadora como $A \cos \omega_c t$, la señal modulada en AM sería:

$$\phi_{AM}(t) = [A + m_p \cos \omega_m t] \cos(\omega_c t)$$

El índice de modulación de esta señal es $im = m_p/A$ entonces reescribiendo la ecuación tenemos:

$$\phi_{AM}(t) = A[1 + im \cos \omega_m t] \cos \omega_c t$$

Si $f(t)$ es un tono de amplitud unitaria ($m_p = 1$) entonces las formas de onda de AM en función de 'm' son:



f. Potencia de la Portadora y Bandas Laterales en AM

La portadora libre representa un "desperdicio" de potencia, sin embargo permite que el receptor sea más sencillo.

Reescribiendo la forma general de la señal AM:

$$f_{AM}(t) = A \cos \omega_c t + A m f(t) \cos(\omega_c t)$$

Suponiendo una carga de 1Ω se obtiene la potencia de la señal AM:

$$P_{tx} = \overline{f_{AM}^2(t)} = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} m^2 \overline{f^2(t)} = P_c + P_s$$

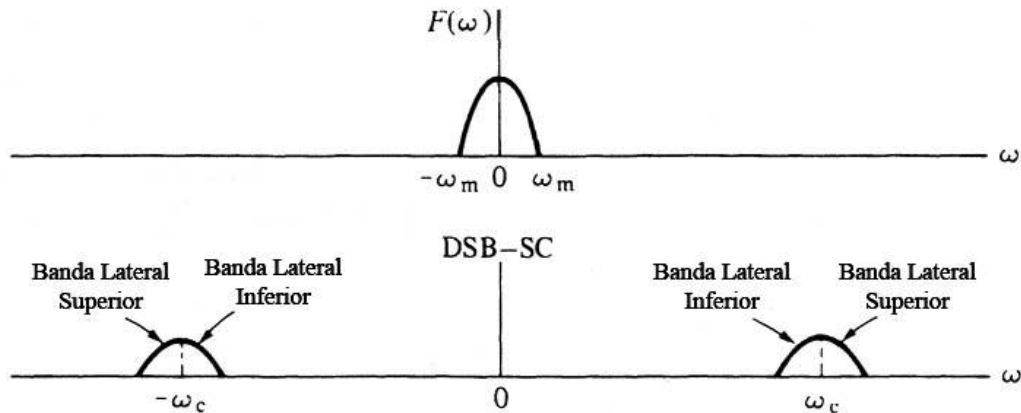
La eficiencia de potencia es la fracción de potencia total que transportan las bandas laterales y se define como:

$$\mu = \eta_p = \frac{P_s}{P_{tx}} = \frac{m^2 \overline{f^2(t)}}{1 + m^2 \overline{f^2(t)}}$$

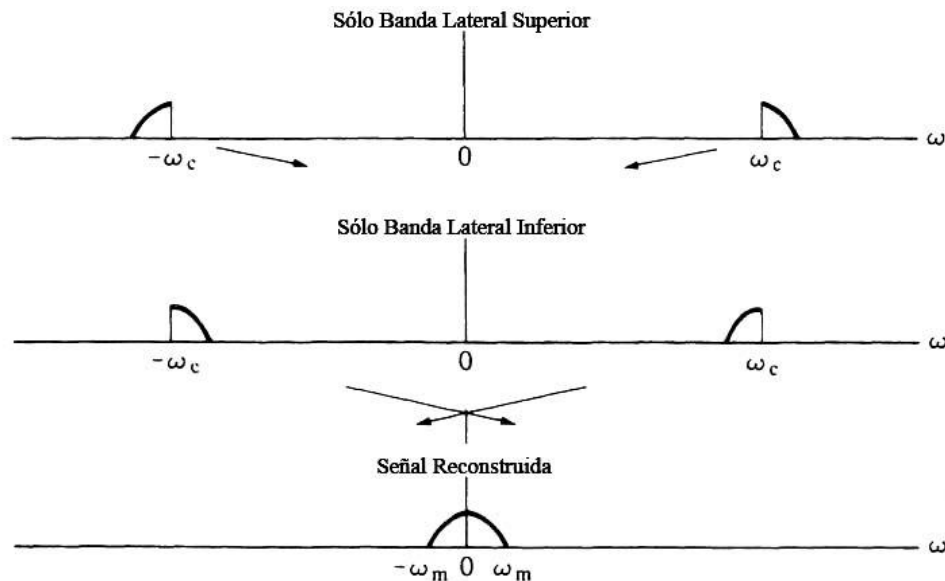
Pregunta: ¿Cuál sería el máximo valor de μ para un tono?

3. Banda Lateral Única (SSB-SC)

En la modulación DSB (-SC) se observa que al multiplicar $f(t)$ por una portadora, el ancho de banda se duplica debido a que la banda negativa de $F(\omega)$ pasa al lado positivo (simetría en frecuencia):



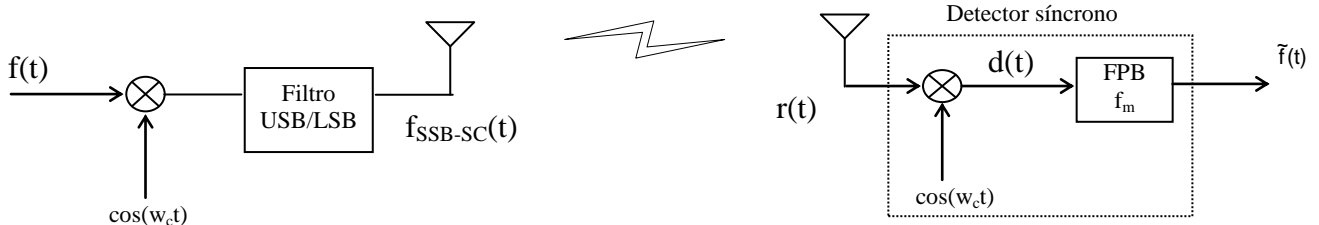
Hay dos bandas laterales: una superior USB y una inferior LSB con sus respectivas imágenes las cuales contienen la información completa de la señal mensaje. Entonces es suficiente con enviar una de las bandas laterales:



Como se observa, es posible enviar sólo una banda y recuperar la señal mensaje original con un detector síncrono. A este tipo de modulación se le conoce como Banda Lateral Única.

a. Generación AM-BLU:

Método de Discriminación de Frecuencias



Un método sencillo de generar señales SSB es el siguiente:

- Modular la señal mensaje en doble banda lateral (DSB)
- Pasar por un filtro $H(\omega)$ cuya frecuencia de corte menor sea ω_c y su ancho de banda sea mayor a la señal mensaje.
- Obtenemos sólo la banda superior (y su imagen negativa)