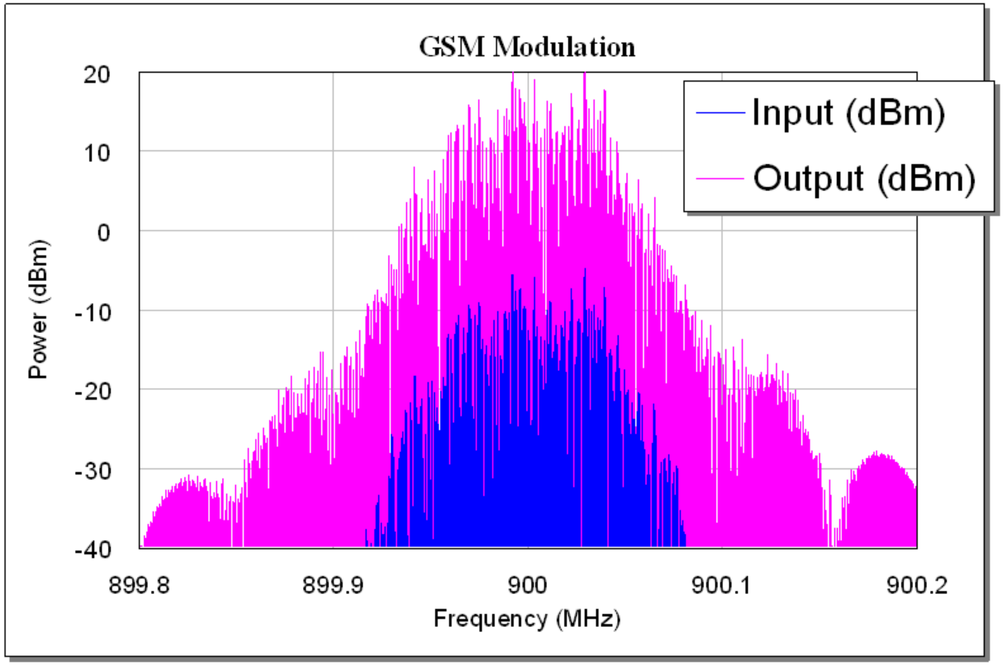
Moduladores



Universidad Tecnológica Nacional de Argentina - F. R. Córdoba Departamento de Electrónica - Electrónica Aplicada III
Daniel Rabinovich drabinovich@electronica.frc.utn.edu.ar
Ramón Oros roros@electronica.frc.utn.edu.ar
Claudio Paz cpaz@frc.utn.edu.ar
Año 2015

Referencias

- [1] François de Dieuleveult, Olivier Romain; Électronique Appliquée aux Hautes Fréquences, Dunod, Paris, 2008
- [2] Michael P. Fitz, Fundamentals of Communication Systems, McGraw-Hill, 2007
- [3] Manuel S. Pérez, Belé G. Iragüen, José L. Fernández Jambrina, Manuel S. Castañer, Electrónica de Comunicaciones, Pearson Prentice Hall; August 1953
- [4] Paul Tobin, PSpice for Analog Comm Eng, Morgan & Claypool, 2007
- [5] Paul Tobin, PSpice for Digital Comm Eng, Morgan & Claypool, 2007
- [6] Jon B. Hagen, Radio-Frequency Electronics, Circuits, Cambridge University Press, 2009
- [7] H.C Krauss, C.W. Bostian, F.H Raab, Solid State Radio Engineering, John Wiley & Sons, 1980
- [8] Grahame Smillie, Analogue and Digital Communication Techniques; Newnes, 1999
- [9] Wayne Tomasi, Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced, Fourth Edition; Prentice Hall, 2001

Moduladores Parte 2

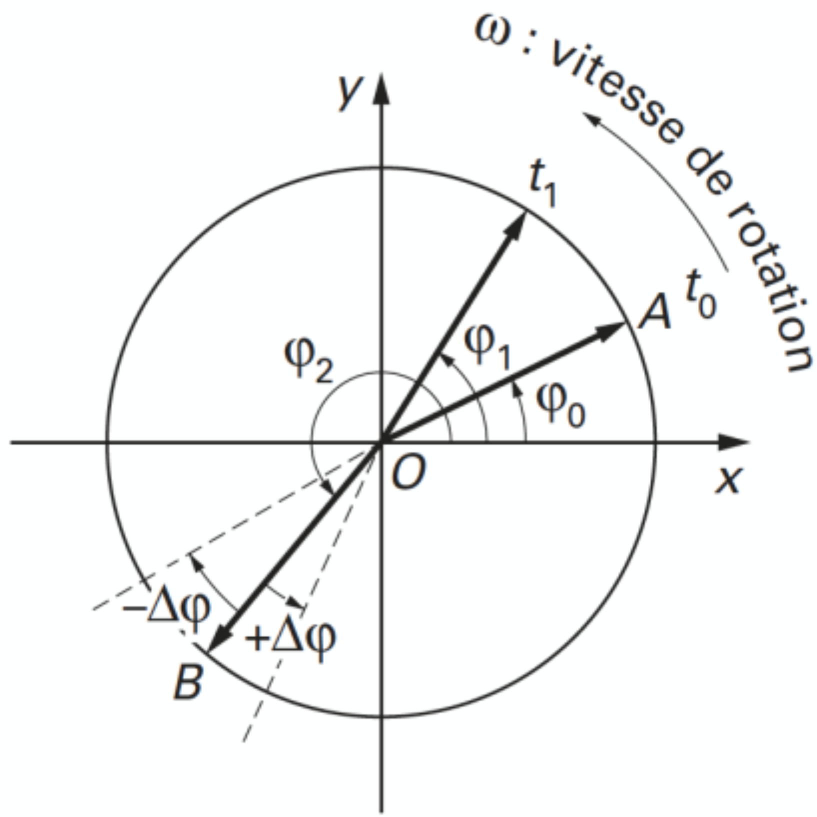
Modulaciones angulares

Moduladores

Sea la portadora

$$n(t) = A\left(\cos \omega t + \varphi\right)$$

Moduladores



Moduladores

Modulación de frecuencia por una señal senoidal

$$m(t) = \cos \omega_1 t$$

$$n(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

Si la portadora se modula en frecuencia significa que w varía de forma lineal con la señal modulante m(t). Tenemos:

$$\omega t + \varphi = \delta$$

Moduladores

La derivada de la fase es la frecuencia:

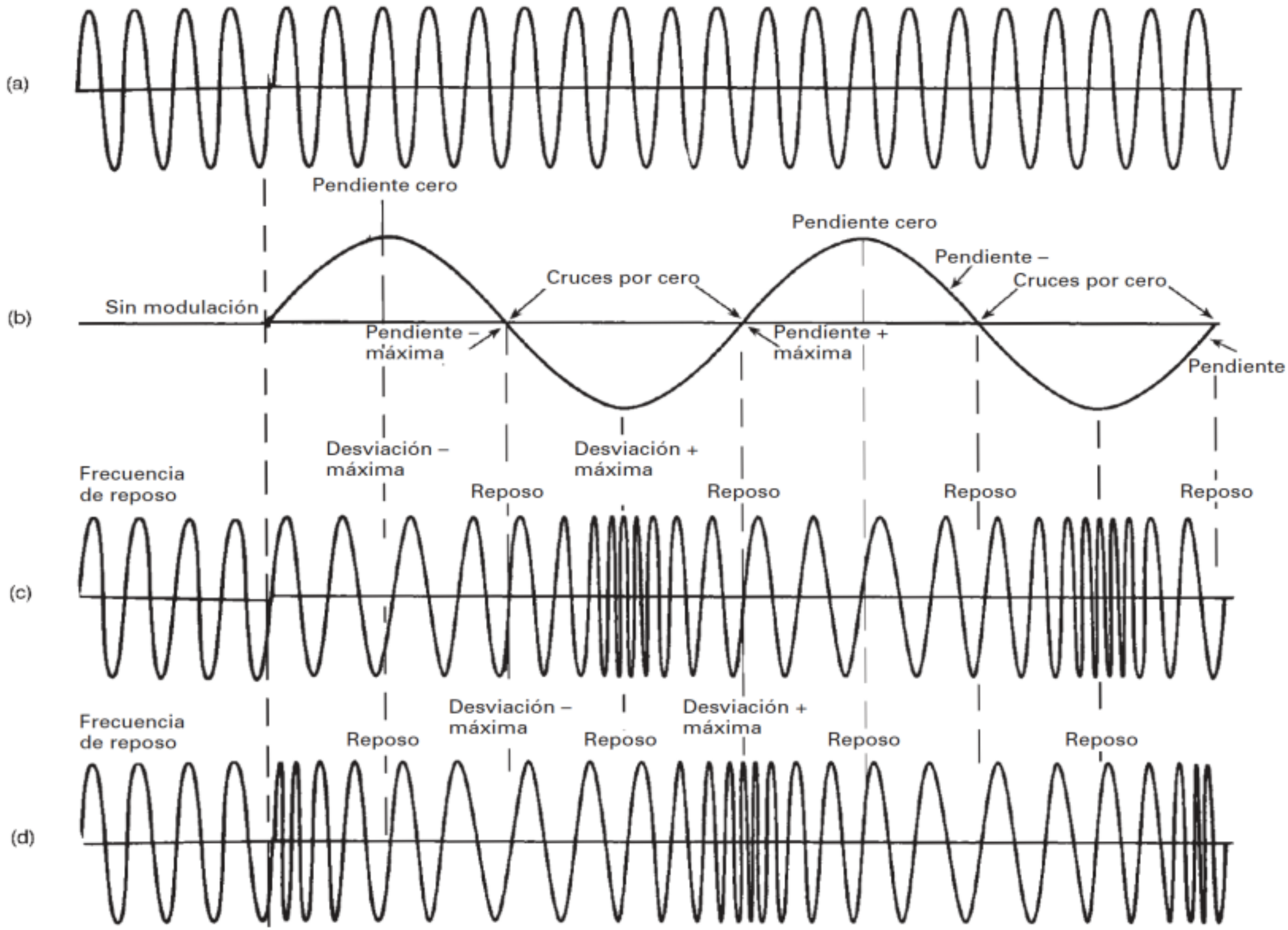
$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\left(\omega t + \varphi\right)}{dt} = \frac{d\left(2\pi f t + \varphi\right)}{dt}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = 2\pi f$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{1}{2\pi}\frac{d\delta}{dt} = f + \Delta f \cos\omega_1 t$$

Moduladores



(b) señal moduladora; (c) onda con frecuencia modulada; (d) onda con fase modulada

Moduladores

Desviación de frecuencia Δf

Por integración se obtiene:

$$\delta = 2\pi f\, t + \frac{\Delta f}{f_1} \sin \omega_1 t + \Phi$$

Sustituyendo d en la ec. de la portadora n(t),

$$n(t) = A \cos \delta$$

$$n(t) = A \cos\left(2\pi f\, t + \frac{\Delta f}{f_1} \sin \omega_1 t + \Phi\right)$$

Moduladores

$$n(t) = A\cos\left(2\pi f\, t + \frac{\Delta f}{f_1}\sin\omega_1 t + \Phi\right)$$

Si se define índice de modulación al valor

$$m_F = \frac{K_1 V_m}{\omega_m} = \frac{\Delta f}{f_m}$$

mF= índice de modulación (adimensional)

K1 =sensibilidad a la desviación (radianes por segundo por volt, o radianes por volt)

Vm =amplitud máxima de la señal moduladora (volts)
w*m*=frecuencia en radianes (radianes por segundo)

Moduladores

$$n(t) = A\cos\left(2\pi f t + m_F \sin\omega_1 t + \Phi\right)$$

$$n(t) = A\left[\sin\left(\omega t + \Phi\right)\cos\left(m_F \sin\omega_1 t\right) + \sin\left(m_F \sin\omega_1 t\right)\cos\left(\omega t + \Phi\right)\right]$$

$$x = \omega t + \Phi$$

$$y = m_F \sin\omega_1 t$$

Moduladores

$$\sin(x+y) = \sin x \cos y + \sin y \cos x$$

$$\cos(z\sin\theta) = J_0(z) + 2\sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z)\cos(2k\theta)$$

$$sin(z\sin\theta) = 2\sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z)\sin(2k+1)\theta$$

Moduladores

$$\cos\left(x\sin y\right) = J_0(x) + 2\left[J_2(x)\cos 2y + J_4(x)\cos 4y + J_6(x)\cos 6y + ...\right]$$

$$\sin\left(x\sin y\right) = 2\left[J_1(x)\cos y + J_3(x)\cos 3y + J_5(x)\cos 5y + J_7(x)\cos 7y + ...\right]$$

Donde $Jn(x)$ son las funciones de Bessel de primera clase, donde n es el orden y x el argumento.
Desarrollando n(t) resulta:

Moduladores

$$n(t) = A\Big\{ \; J_0(m_F)\sin\big(\omega t + \Phi\big) + J_1(m_F)\Big[\sin\big(\omega t + \omega_1 t\big) - \sin\big(\omega t - \omega_1 t\big)\Big]$$

$$+ J_2(m_F)\Big[\sin\big(\omega t + 2\omega_1 t\big) + \sin\big(\omega t - 2\omega_1 t\big)\Big]$$

$$+ J_3(m_F)\Big[\sin\big(\omega t + 3\omega_1 t\big) - \sin\big(\omega t - 3\omega_1 t\big)\Big]$$

$$+ J_4(m_F)\Big[\sin\big(\omega t + 4\omega_1 t\big) + \sin\big(\omega t - 4\omega_1 t\big)\Big] + \ldots \; \Big\}$$

n(t) se puede expresar en forma general:

$$n(t) = A\Big[J_0(m_F)\sin\big(\omega t + \Phi\big) + J_n(m_F)\Big[\sin\big(\omega t + n\omega_1 t\big) + \big(-1\big)^n \sin\big(\omega t - n\omega_1 t\big)\Big]\Big]$$

Moduladores

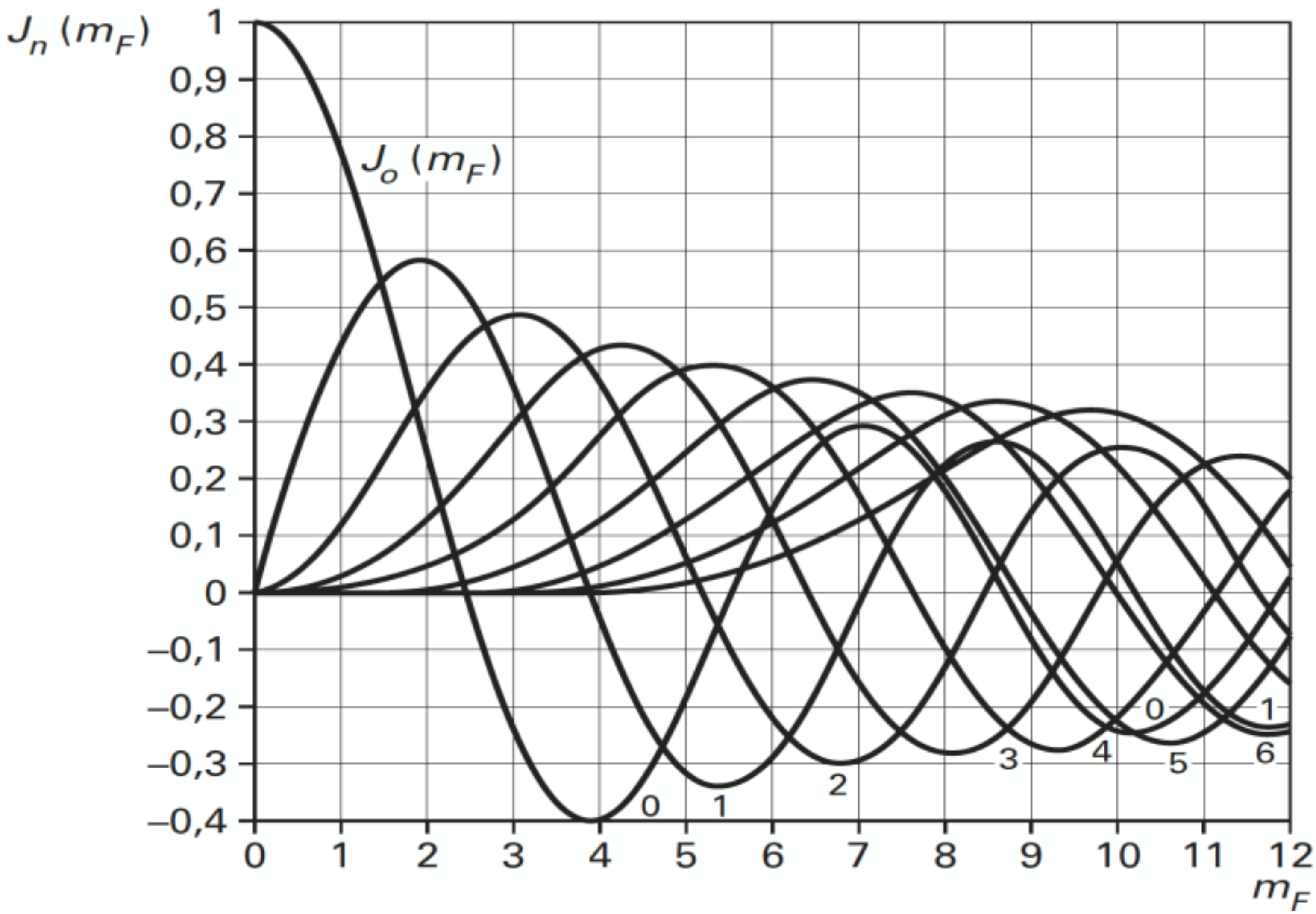
Mediante el análisis de la relación anterior, vemos que el espectro de salida consiste en:

- Una línea en la frecuencia de reposo;

- Un número infinito de líneas laterales con las frecuencias $f \pm nf1$.

La excursión de frecuencia resultante es, por tanto:

$$\Delta = f_1 m_F$$



Representación de las funciones de Bessel de primera clase

Moduladores

	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
0	1,00									
0,25	0,98	0,12								
0,5	0,94	0,24	0,03							
1	0,77	0,44	0,03							
1,5	0,51	0,26	0,23	0,01						
2	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03					
2,5	– 0,05	0,5	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
8,0	0,17	0,23	– 0,11	– 0,29	– 0,10	0,19	0,34	0,32	0,22	0,13
9,0	– 0,09	0,24	0,14	– 0,18	– 0,27	– 0,06	0,20	0,33	0,30	0,21

Modulación de frecuencia por dos señales senoidales

$$m_1(t) = A_1 \cos \omega_1 t$$

$$m_2(t) = A_2 \cos \omega_2 t$$

$$n(t) = A \sin\left(\omega t + \varphi\right)$$

$$n(t) = A \sin\left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1} \sin \omega_1 t + \frac{\Delta f}{f_2} \sin \omega_2 t + \Phi\right)$$

$$m_{F1} = \frac{\Delta f}{f_1} \qquad m_{F2} = \frac{\Delta f}{f_2}$$

Moduladores

Una línea de la frecuencia de reposo f y de amplitud $AJ_0(m_{F1})J_0(m_{F2})$

Líneas a las frecuencias $f \pm \alpha f_1$ de amplitud $AJ_\alpha(m_{F1})J_\alpha(m_{F2})$

Líneas a las frecuencias $f \pm \alpha f_2$ de amplitud $AJ_\beta(m_{F1})J_\beta(m_{F2})$

Líneas a las frecuencias $f \pm \alpha f_1 \pm \beta f_2$ de amplitud $AJ_\alpha(m_{F1})J_\beta(m_{F2})$

alpha y beta son números enteros positivos mayores que o igual a 1.

Moduladores

La presencia de las líneas en las frecuencias $f \pm a f1 \pm b f2$ muestra que el teorema de superposición no funciona para la modulación en frecuencia y en general para modulaciones angulares.

Por esta razón,

modulaciones de amplitud --→modulaciones lineales y

las modulaciones angulares--→no lineales.

Moduladores

Banda de Carson

Bajo índice, el espectro de frecuencias se asemeja al de la AM de banda lateral doble, y el ancho mínimo de banda es aproximadamente igual a

$$B = 2\,f_m\,[Hz]$$

Índice alto, el ancho mínimo de banda aproximado es

$$B = 2\,\Delta f\,[Hz]$$

Moduladores

Ancho mínimo de banda de una onda con modulación angular, usando la tabla de funciones de Bessel, es

$$B = 2\left(n * f_m\right)$$

n =cantidad de bandas laterales significativas
fm = frecuencia de la señal moduladora (hertz)

Moduladores

Esta regla establece el ancho de banda necesario para transmitir una onda con modulación angular, como:

$$B = 2\left(m_F + 1\right) f_{1\max}$$

f1max es la frecuencia máxima de la señal moduladora

$$m_F = \frac{\Delta f}{f_{1\max}}$$

Moduladores

La fórmula de Carson también puede escribirse

$$B = 2\left(\Delta f + f_{1\max}\right)$$

El criterio de selección de rayas de amplitud o potencia significativa es arbitrario, en ese caso se modifica por

$$B_1 = 2\left(\Delta f + \alpha f_{1\max}\right)$$

Siendo alpha un valor entre 1 y 2

Ejemplo 7.6: Modulador de FM 88-108MHz.

Sea el caso de radiodifusión en FM en la banda de 88-108MHz, con las siguientes especificaciones

$$\Delta f = 75KHz$$

$$f_{1\max} = 15kHz$$

Calcule la distribución espectral de la onda modulada si α vale 2.

Respuesta:

$$m_F = \frac{\Delta f}{f_{1\max}} = \frac{75}{15} = 5$$

$$B = 2\left(\Delta f + f_{1\max}\right) = 2\left(75 + 15\right) = 180kHz$$

$$B_1 = 2\left(\Delta f + \alpha f_{1\max}\right) = 2\left(75 + 2 * 15\right) = 210kHz$$

Estos resultados tienen un margen de error de 180/210=0.857, es decir del 15%.

Ejemplo 7.7: Modulador de FM

Para un modulador de FM con desviación máxima de frecuencia $\Delta f = 10kHz$, una frecuencia de s

$f_{1\max} = 10kHz$ una portadora de 500 kHz, determinar:

(a) El ancho de banda mínimo y real mediante la tabla de funciones de Bessel.

(b) El ancho mínimo aproximado de banda, con la regla de Carson.

(c) Graficar el espectro de frecuencias de salida con la aproximación de Bessel.

Respuesta:

$$m_F = \frac{\Delta f}{f_{1\max}} = \frac{10}{10} = 1$$

Según la tabla 7-4, un índice de modulación de 1 produce tres conjuntos de bandas laterales significa

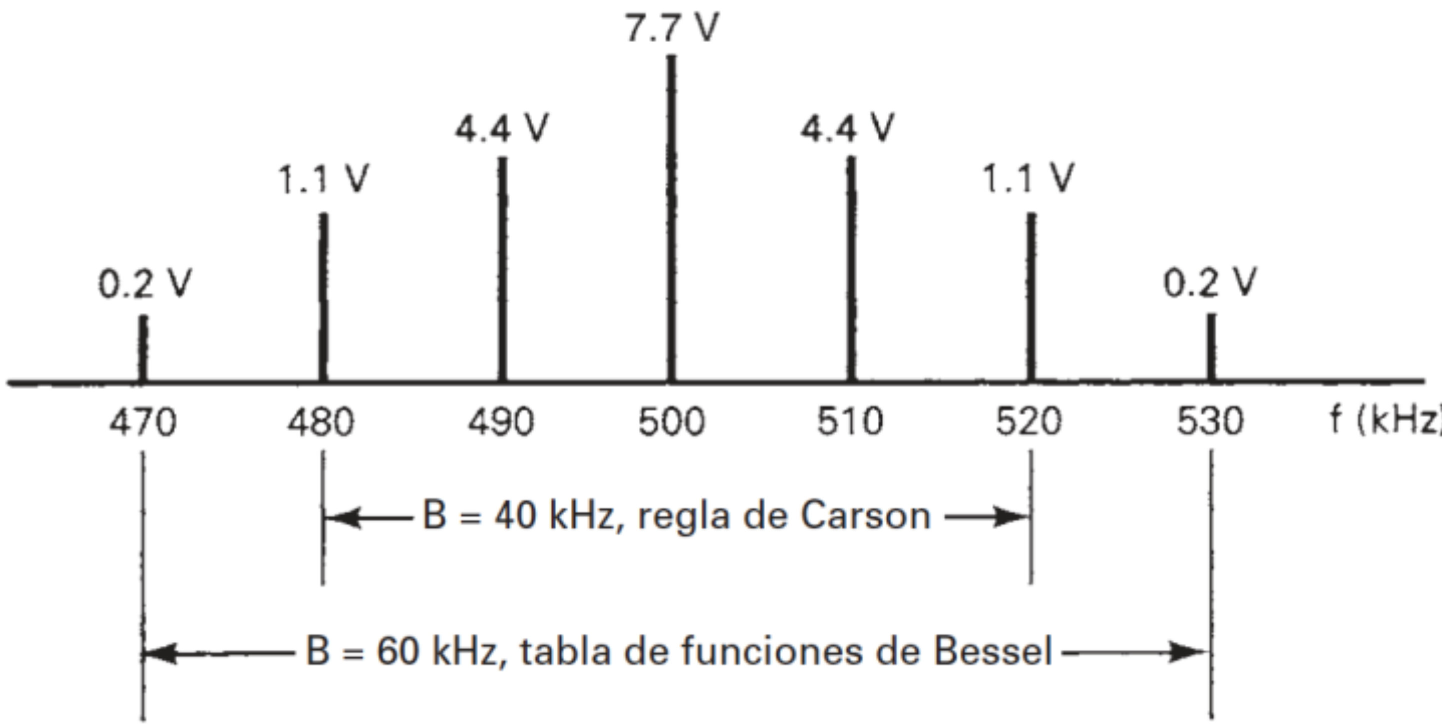
Se sustituye en la ecuación 7.110, y el ancho de banda es

$$B = 2\left(n * f_m\right) = 2\left(3 * 10kHz\right) = 60kHz$$

(b) De acuerdo con la ecuación 7.113, el ancho mínimo de banda es

$$B = 2\left(\Delta f + f_{1\max}\right) = 2\left(10 + 10\right) = 40kHz$$

Moduladores



Moduladores

- Si $mF<1$ corresponde a banda estrecha

- Si $mF>1$ corresponde a banda ancha

Moduladores

Relación de desviación, DR

$$DR = \frac{\Delta f_{\max}}{f_{1\max}} = \frac{\Delta f_{\max}}{f_{m\_\max}}$$

Ejemplo 7.8: Modulador de FM, DR

(a) Determinar la relación de desviación y el ancho de banda para el índice de modulación en el peor c

(ancho de banda máximo) en un transmisor en la banda comercial de FM con una desviación máxima

frecuencia de 75 kHz y una frecuencia máxima de señal moduladora de 15 kHz.

(b) Calcular la relación de desviación y el ancho de banda máximo para un índice igual de modulación

la mitad de desviación de frecuencia máxima y la frecuencia de la señal moduladora.

Respuesta:

(a) La relación de desviación se calcula sustituyendo en la ecuación 7.115

$$DR = \frac{\Delta f_{\max}}{f_{1\max}} = \frac{75kHz}{15kHz} = 5$$

Según la tabla 7.4, un índice de modulación de 5 produce 8 bandas laterales significativas.

Se sustituye en la ecuación 7.110, y el ancho de banda es

$$B = 2(n * f_m) = 2(8 * 15kHz) = 240kHz$$

(b) Para una desviación de frecuencia de 37.5 kHz y una desviación de frecuencia de la señal modulad

fm =7.5 kHz, el índice de modulación es

Moduladores

Por ejemplo, una señal moduladora de 1 kHz que produzca 10 kHz de desviación de frecuencia tiene un índice de modulación m = 10 y produce 14 conjuntos distintos de bandas laterales. Sin embargo, las bandas laterales sólo están desplazadas 1 kHz entre sí y, en consecuencia, el ancho de banda total es 28,000 Hz [2(14 1000)].
Con la regla de Carson, las mismas condiciones producen el ancho de banda más amplio (el peor de los casos).
Para la desviación máxima de frecuencia y la frecuencia máxima de señal moduladora, el ancho de banda máximo usando la regla de Carson para el ejemplo es

$$B = 2\left(\Delta f + f_{1\max}\right) = 2\left(15 + 15\right) = 180 kHz$$

Moduladores

Banda comercial de FM

La FCC ha asignado una banda de frecuencias de 20 MHz al servicio de emisiones de FM, que va de los 88 a los 108 MHz. Esta banda de 20 MHz se divide en canales de 100 y 200 kHz de ancho que comienzan en 88.1 MHz; es decir, 88.3 MHz, 88.5 MHz y así sucesivamente. Para obtener una música de alta calidad y confiable, la desviación máxima de frecuencia permitida es 75 kHz con una frecuencia máxima de señal moduladora de 15 kHz.

Moduladores

El ancho de banda mínimo y necesario para pasar todas las frecuencias laterales significativas es

B = 2(8 *15 Hz) = 240 kHz,

que es 40 kHz mayor que el ancho de banda asignado por la FCC.

Si se usa la aproximación de Carson, el ancho de banda para los canales comerciales es 2(75 kHz *15 kHz) =180 kHz, bastante bien dentro de los límites de banda asignados por la FCC.

Moduladores

Modulación en fase

$$m(t) = \cos\omega_1 t$$

$$n(t) = A\sin\left(\omega t + \varphi\right)$$

La fase de la portadora oscila en torno al valor central φ al ritmo de la modulación, con una diferencia máximo de $\Delta\theta$. Las variaciones de fase $\Delta\varphi$ son iguales a:

$$\Delta\varphi = \Delta\theta_m(t) = \Delta\theta\cos\omega_1 t$$

Moduladores

La ecuación de la portadora modulada en fase es,

$$n(t) = A\sin\left(\omega t + \Delta\theta\cos\omega_1 t + \varphi\right)$$

$$x = \omega t + \varphi$$

$$y = \Delta\theta\cos\omega_1 t$$

Como

$$\sin\left(x + y\right) = \sin x\cos y + \sin y\cos x$$

$$n(t) = A\sin\left(\omega t + \varphi\right)\cos\left(\Delta\theta\cos\omega_1 t\right) + \sin\left(\Delta\theta\cos\omega_1 t\right)\cos\left(\omega t + \varphi\right)$$

Moduladores

Funciones de Bessel

$$\cos\left(z\cos\theta\right) = J_0(z) + 2\sum_{k=1}^{\infty}\left(-1\right)^k J_{2k}(z)\cos\left(2k\theta\right)$$

$$sin\left(z\cos\theta\right) = 2\sum_{k=0}^{\infty}\left(-1\right)^k J_{2k+1}(z)\cos\left(2k+1\right)\theta$$

$$\cos\left(y\right) = J_0(\Delta\theta) - 2\left[J_2(\Delta\theta)\cos 2\omega_1 t - J_4(\Delta\theta)\cos 4\omega_1 t + J_6(\Delta\theta)\cos 6\omega_1 t - \ldots + \ldots\right]$$

$$\sin\left(y\right) = 2\left[J_1(\Delta\theta)\cos\omega_1 t - J_3(\Delta\theta)\cos 3\omega_1 t + J_5(\Delta\theta)\cos 5\omega_1 t - J_7(\Delta\theta)\cos 7\omega_1 t + \ldots\right]$$

Moduladores

Desarrollando n(t) resulta

$$
\begin{aligned}
n(t) = A\Big\{ \; & J_0(\Delta\theta)\sin\left(\omega t+\varphi\right) \\
& + J_1(\Delta\theta)\left[\cos\left(\omega t+\omega_1 t+\varphi\right)+\cos\left(\omega t-\omega_1 t+\varphi\right)\right] \\
& - J_2(\Delta\theta)\left[\sin\left(\omega t+2\omega_1 t+\varphi\right)+\sin\left(\omega t-2\omega_1 t+\varphi\right)\right] \\
& - J_3(\Delta\theta)\left[\cos\left(\omega t+3\omega_1 t+\varphi\right)+\cos\left(\omega t-3\omega_1 t+\varphi\right)\right] \\
& + J_4(\Delta\theta)\left[\sin\left(\omega t+4\omega_1 t+\varphi\right)+\sin\left(\omega t-4\omega_1 t+\varphi\right)\right]+\ldots \;\Big\}
\end{aligned}
$$

Moduladores

Como en modulación de frecuencia, observamos que el espectro de la señal modulada en fase comprende:
- Una línea en la frecuencia de reposo;
- Un número infinito de líneas laterales con las frecuencias $f \pm nf_1$

Como en modulación de frecuencia, la potencia total contenida en cada banda es igual a la potencia de la portadora no modulada.

La relación de Carson también es aplicable y la eficiencia espectral se reduce a una simple fórmula:

$$B = 2\left(m_p + 1\right) f_{1\max} \qquad m_p = Kv_m$$

Moduladores

$$B = 2\left(m_p + 1\right) f_{1\max} \qquad m_p = K v_m$$

1. *Desviación instantánea de fase*.
Es el cambio instantáneo de fase de la portadora.
La desviación instantánea de fase se describe matemáticamente como sigue

desviación instantánea de fase= $\theta(t)$ RAD

Moduladores

2. Fase instantánea.
Es la fase precisa de la portadora instantánea

Fase instantánea = $\omega_c t + \theta(t)$ RAD

3. Desviación instantánea de frecuencia.

desviación instantánea de frecuencia= $\theta'(t)$ RAD/S

Moduladores

4. Frecuencia instantánea.

Frecuencia instantánea= $\omega_i(t) = \frac{d}{dt}\left[\omega_c t + \theta(t)\right] = \omega_c t + \theta'(t)$ RAD/S

Sensibilidad a la desviación

modulación de fase= $\theta(t) = K v_m(t)$ RAD/S

modulación de frecuencia= $\theta'(t) = K_1 v_m(t)$ RAD/S

Moduladores

Sensibilidad a la desviación de un modulador de fase

$$K = \frac{\Delta\theta}{\Delta v_m}\left(\frac{rad}{V}\right)$$

Sensibilidad a la desviación de un modulador de frecuencia

$$K_1 = \frac{\Delta\omega}{\Delta v_m}\left(\frac{rad/s}{V}\right)$$

Moduladores

modulación de fase= $\theta(t) = \int \theta'(t)\,dt = \int K_1 v_m(t)\,dt = K_1 \int v_m(t)\,dt$

Modulación de fase,

$$m(t) = V_C \cos\left[\omega_c t + \theta(t)\right]$$
$$= V_C \cos\left[\omega_c t + KV_m \cos(\omega_m t)\right]$$

Modulación de frecuencia,

$$m(t) = V_C \cos\left[\omega_c t + \int \theta'(t)\right]$$
$$= V_C \cos\left[\omega_c t + \int K_1 v_m(t)\,dt\right]$$
$$= V_C \cos\left[\omega_c t + K_1 \int V_m \cos(\omega_m t)\,dt\right]$$
$$= V_C \cos\left[\omega_c t + \frac{K_1 V_m}{\omega_m} \sin(\omega_m t)\right]$$

Moduladores

Tabla 7.5. Ecuaciones para portadoras de fase y frecuencia modulada

Tipo de modulación	Señal moduladora	Onda con modulación angular, m(t)
(a) Fase	$v_m(t)$	$V_C \cos\left[\omega_c t + K v_m(t)\right]$
(b) Frecuencia	$v_m(t)$	$V_C \cos\left[\omega_c t + K_1 \int v_m(t)\,dt\right]$
(c) Fase	$v_m(t)\cos(\omega_m t)$	$V_C \cos\left[\omega_c t + K\, v_m(t)\cos(\omega_m t)\right]$
(d) Frecuencia	$v_m(t)\cos(\omega_m t)$	$V_C \cos\left[\omega_c t + \dfrac{K_1 V_m}{\omega_m}\sin(\omega_m t)\right]$

Moduladores

Desviación de fase e índice de modulación

$$m(t) = V_c \cos\left[\omega_c t + \underbrace{m\cos(\omega_m t)}_{Desv.\,fase\,inst.\,\theta(t)}\right]$$

índice de modulación de una portadora con fase modulada:

$$m_p = KV_m$$

Moduladores

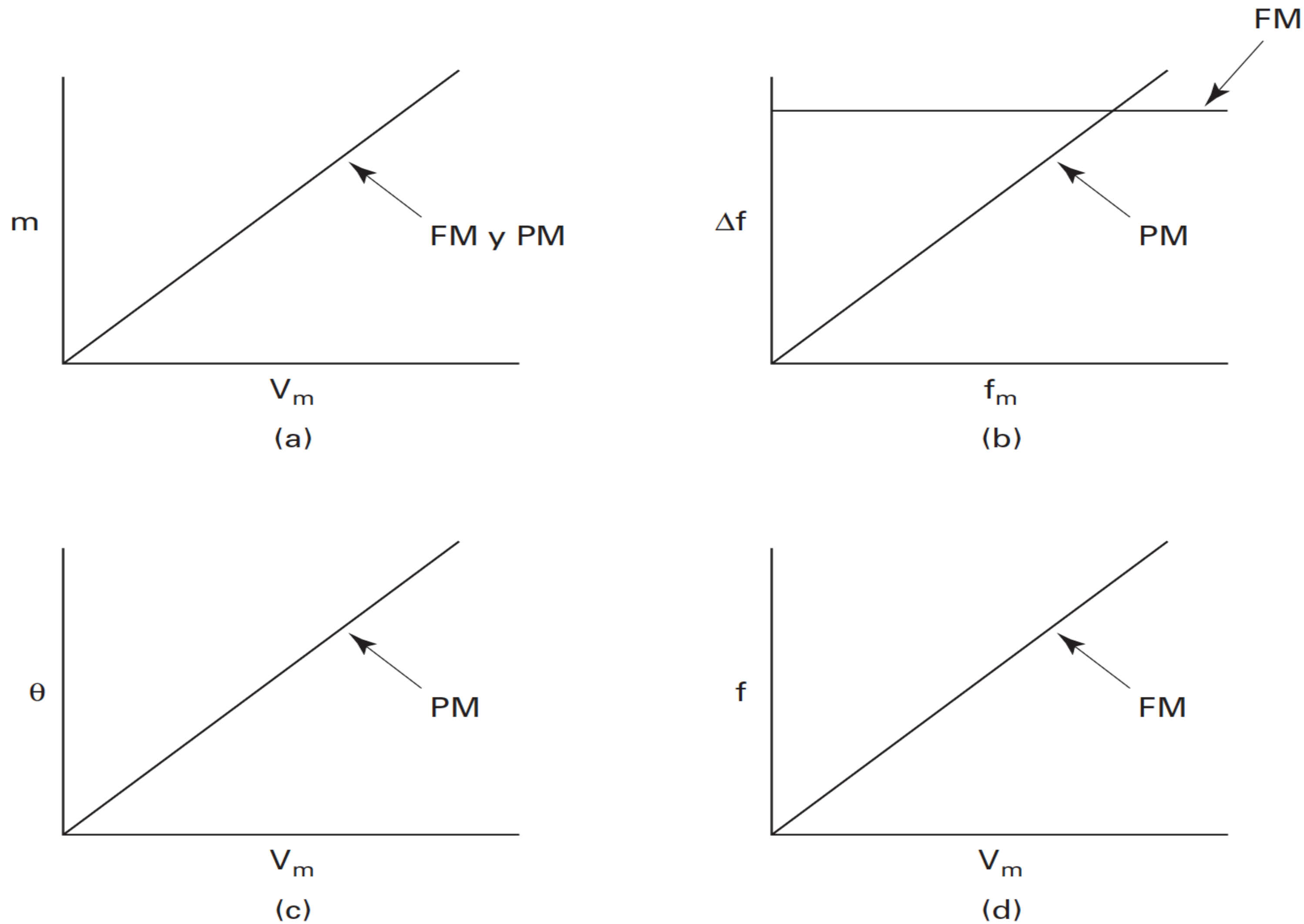
Por consiguiente, para PM se puede escribir como sigue:

$$m(t) = V_c \cos\left[\omega_c t + KV_m \cos(\omega_m t)\right]$$

$$m(t) = V_c \cos\left[\omega_c t + \Delta\theta \cos(\omega_m t)\right]$$

$$m(t) = V_c \cos\left[\omega_c t + m_p \cos(\omega_m t)\right]$$

Moduladores



Moduladores

	Modulation de fréquence FM	**Modulation de phase ΦM**
Indice de modulation	$\dfrac{\Delta F}{f_{1\max}}$	$\Delta\theta$
Déviation de fréquence	ΔF	$f_{1\max}\,\Delta\theta$
Schéma synoptique avec modulateur de phase	$\text{BF} \longrightarrow \boxed{\int} \longrightarrow \Phi \longrightarrow \text{FM}$ Modulateur de phase	$\text{BF} \longrightarrow \Phi \longrightarrow \Phi\text{M}$ Modulateur de phase
Schéma synoptique avec modulateur de fréquence	$\text{BF} \longrightarrow \text{FM} \longrightarrow \text{FM}$ Modulateur de fréquence	$\text{BF} \longrightarrow \boxed{\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}} \longrightarrow \text{FM} \longrightarrow \Phi\text{M}$ Modulateur de fréquence

Moduladores

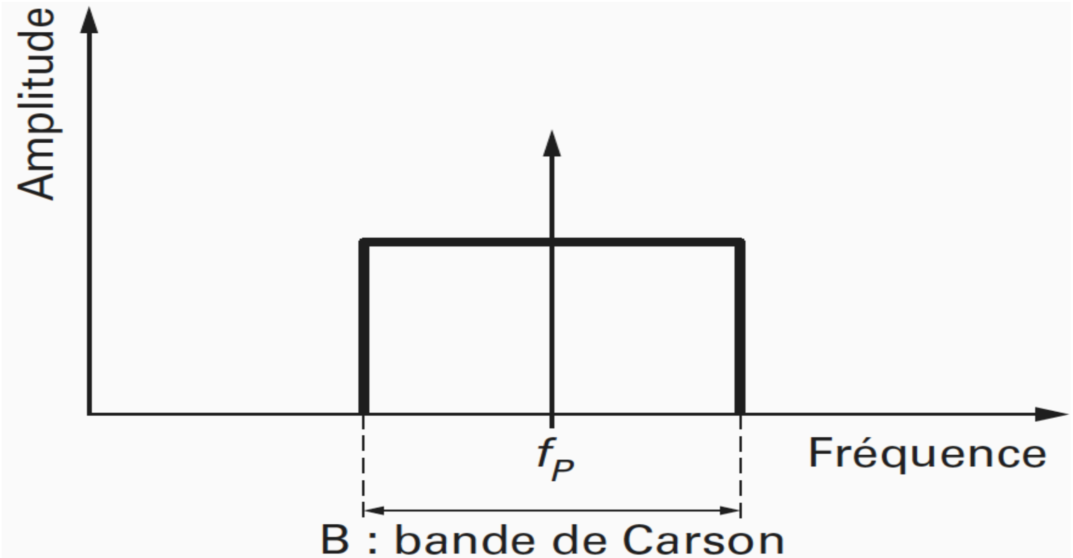
Relación señal/ruido en un modulador en frecuencia

$$\left(\frac{S}{B}\right)_S FM = 3m_F^2\left(m_F + 1\right)\left(\frac{C}{N}\right)$$

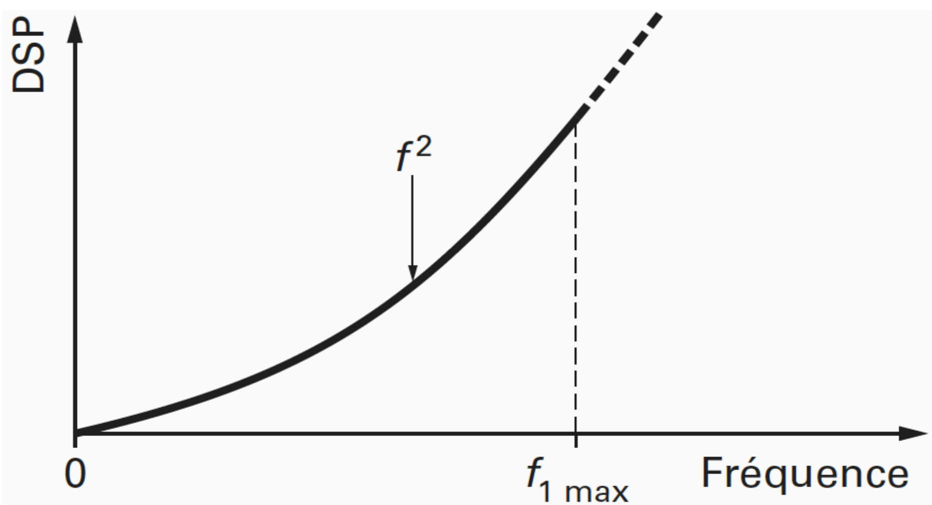
$$\left(\frac{S}{B}\right)_S FM = \frac{3}{2}m_F^2 \frac{C}{kTf_{1\max}}$$

A la salida del demodulador, la potencia de la portadora C es constante y es igual a la potencia de la portadora sin modular.

Moduladores



Espectro ruido entrada



Densidad espectral ruido salida modulador

Moduladores

Relación señal/ruido en un modulador en FASE

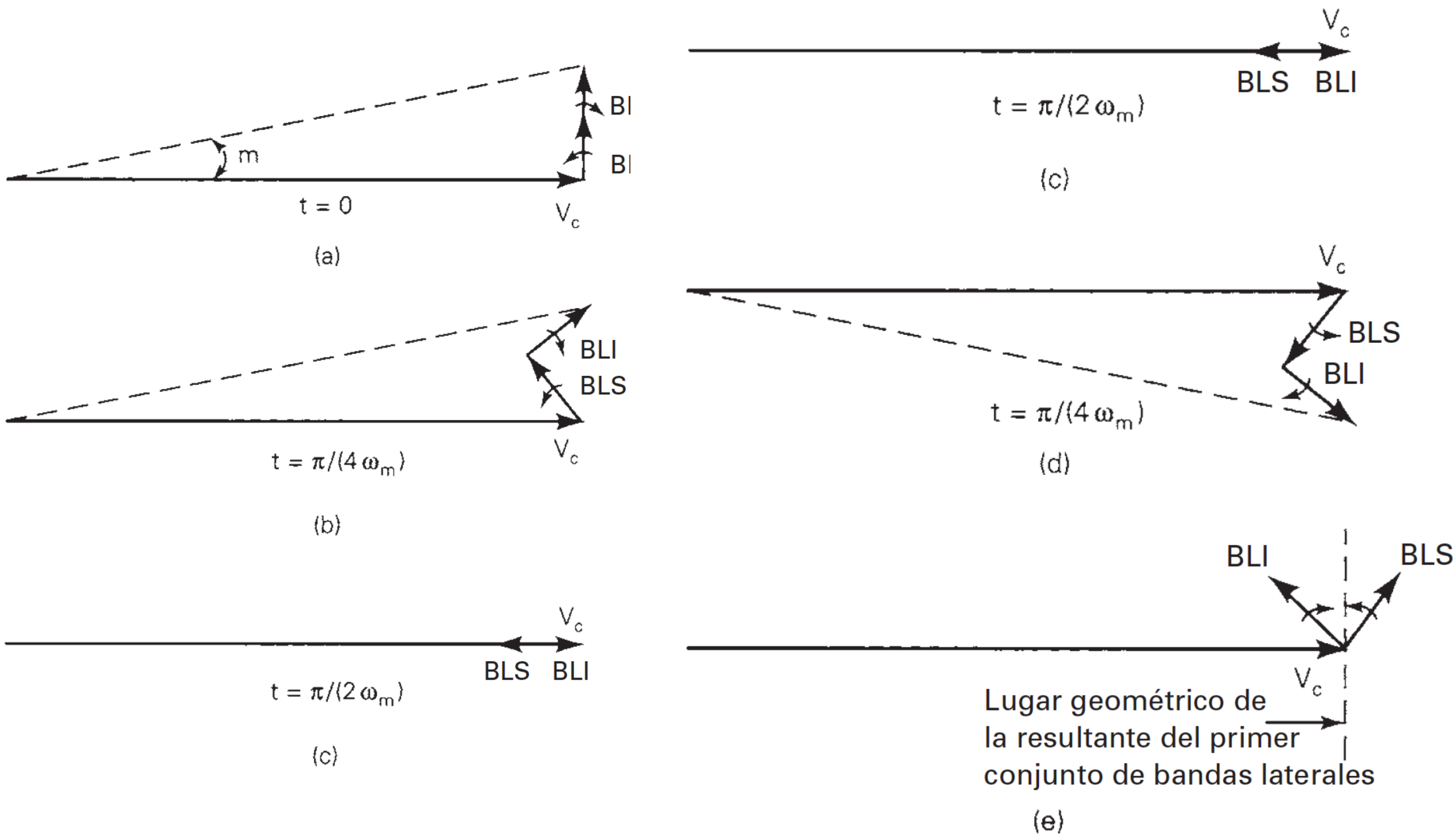
$$\left(\frac{S}{B}\right)_S PM = m_F^2 \left(m_F + 1\right)\left(\frac{C}{N}\right)$$

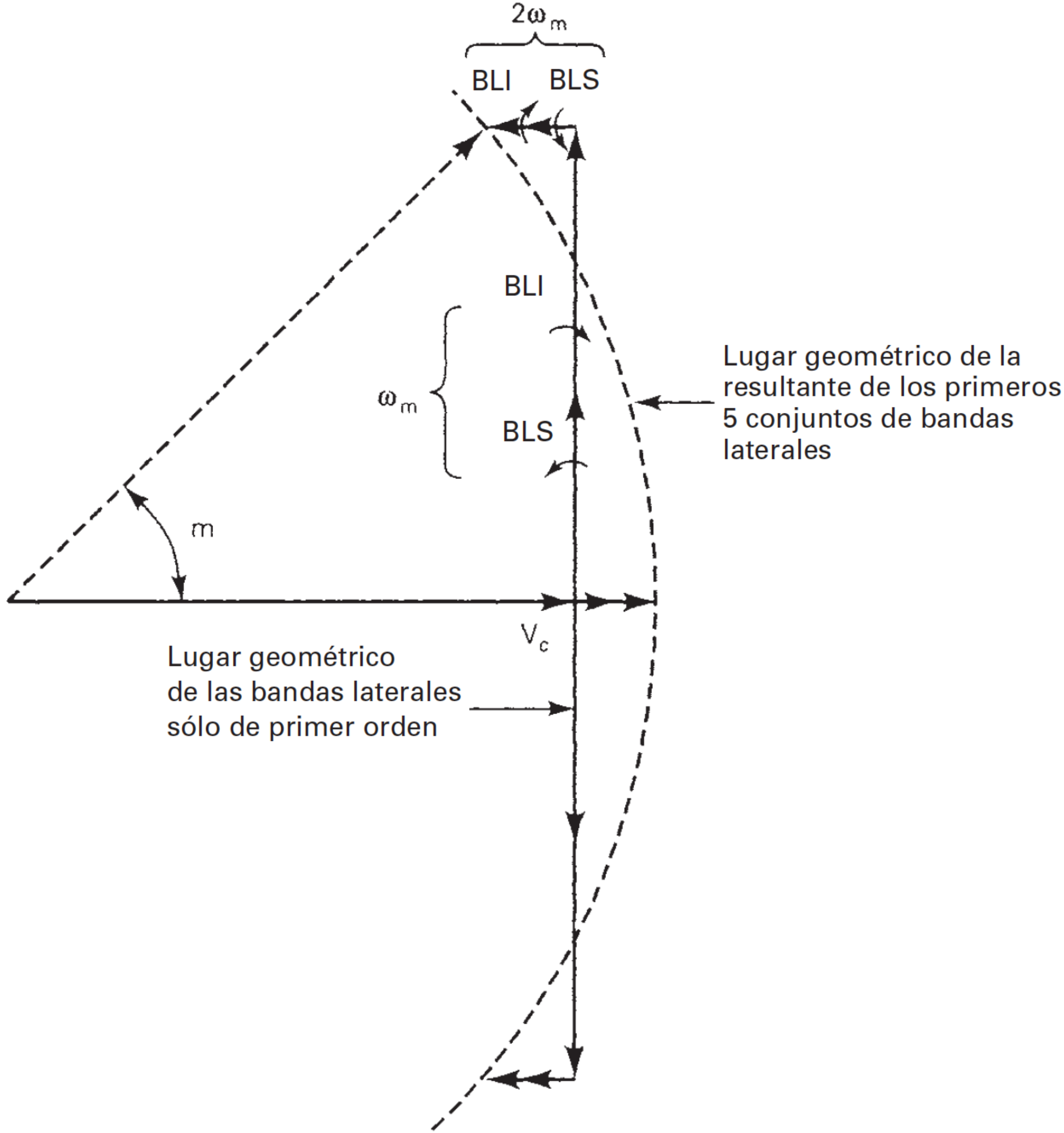
O También
$$\left(\frac{S}{B}\right)_S PM = \frac{m_F^2}{2} \frac{C}{kTf_{1\max}}$$

A la salida del demodulador, la potencia de la portadora C es constante y es igual a la potencia de la portadora sin modular.

Representación fasorial de una onda con modulación angular

Moduladores

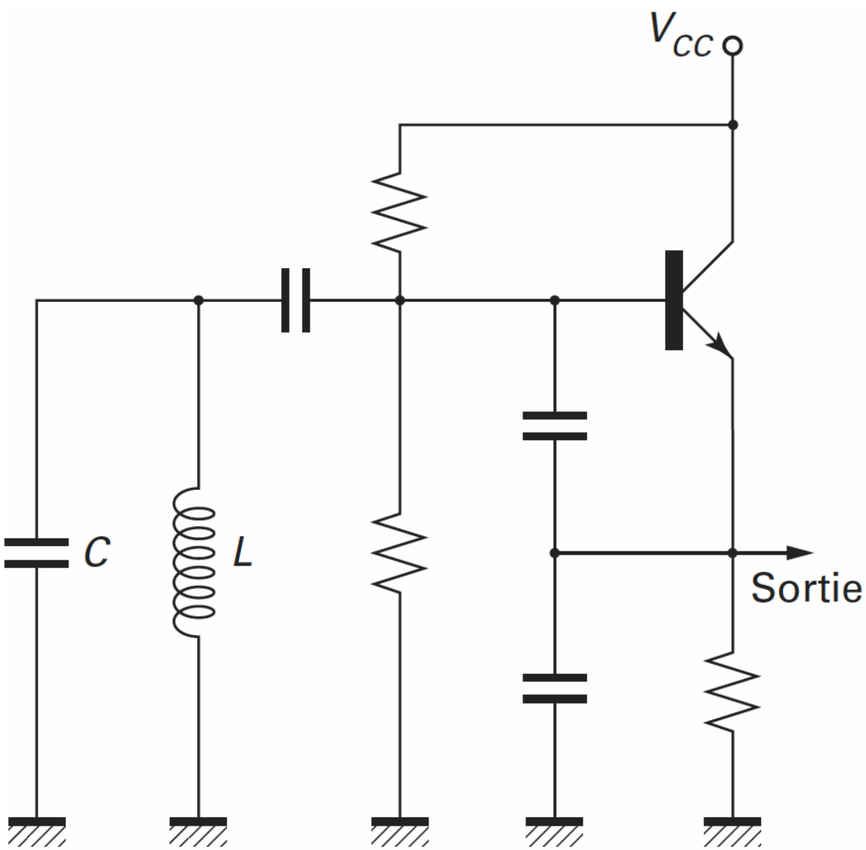




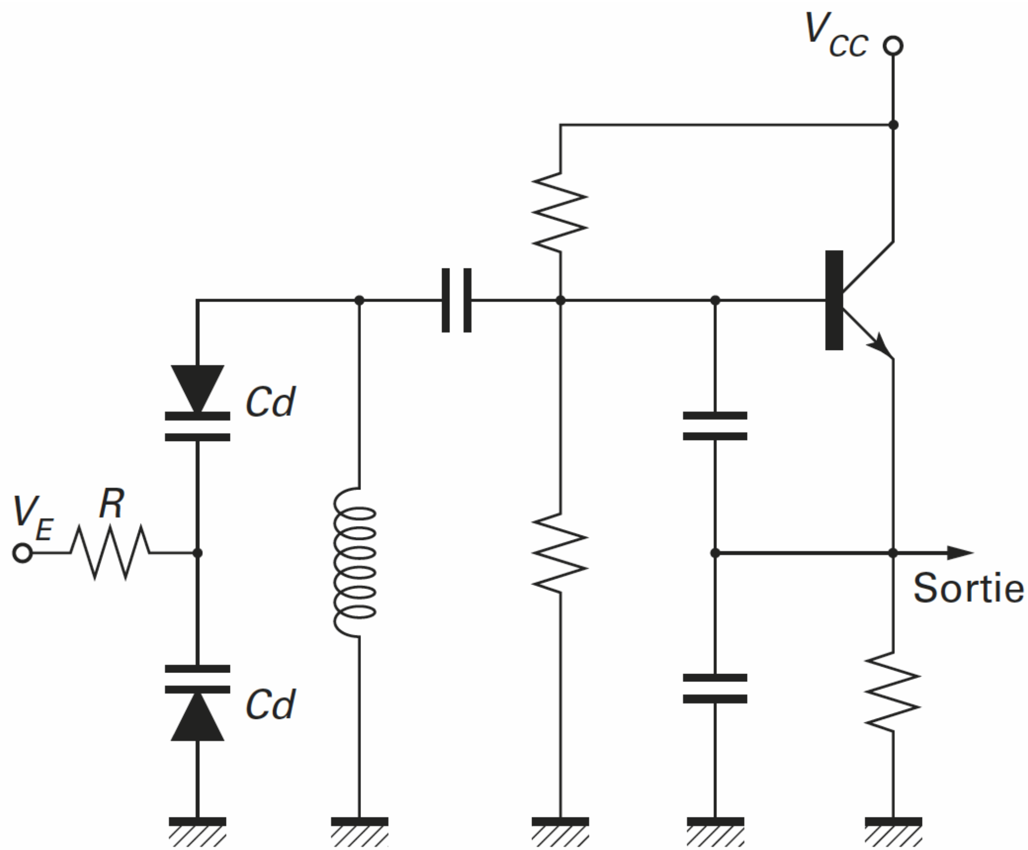
$2\omega_m$
BLI
BLS
BLI
ω_m
BLS
Lugar geométrico de la resultante de los primeros 5 conjuntos de bandas laterales
m
V_c
Lugar geométrico de las bandas laterales sólo de primer orden

Moduladores

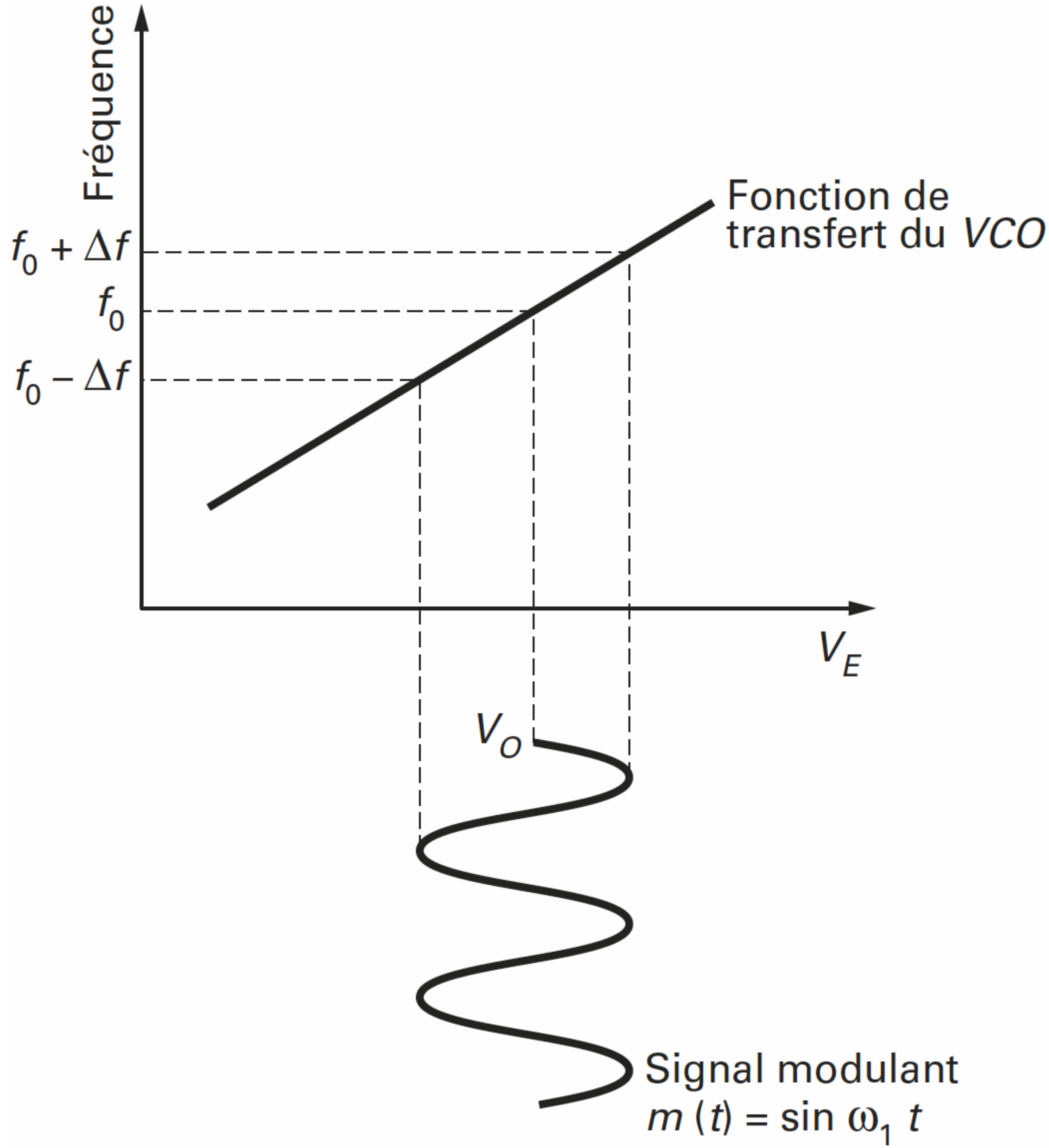
Moduladores de frecuencia por oscilador LC



Oscillateur à fréquence fixe



Oscillateur commandé en tension

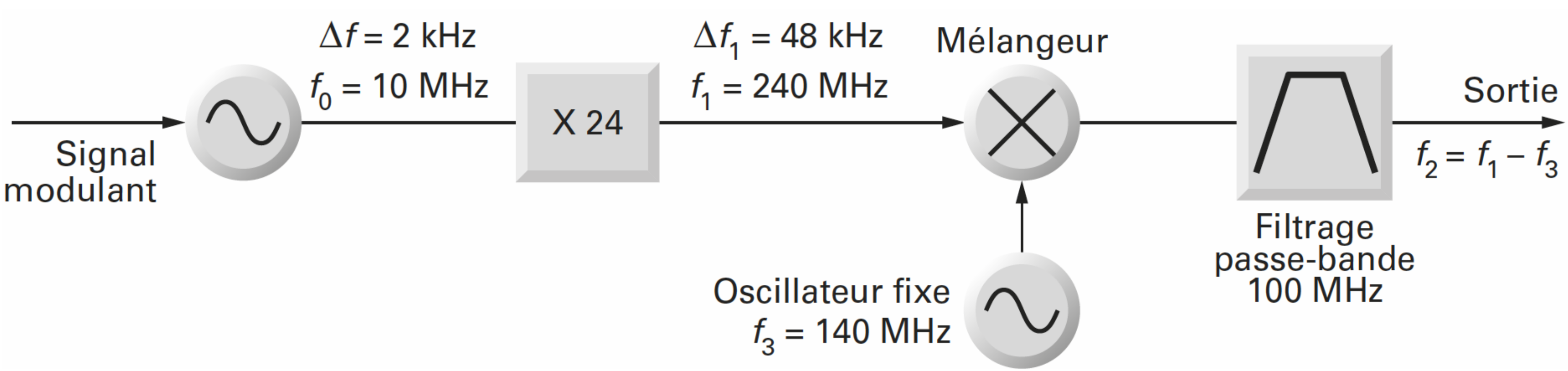


Fréquence
Fonction de transfert du *VCO*
$f_0 + \Delta f$
f_0
$f_0 - \Delta f$
V_E
V_O
Signal modulant
$m\,(t) = \sin \omega_1\, t$

Moduladores

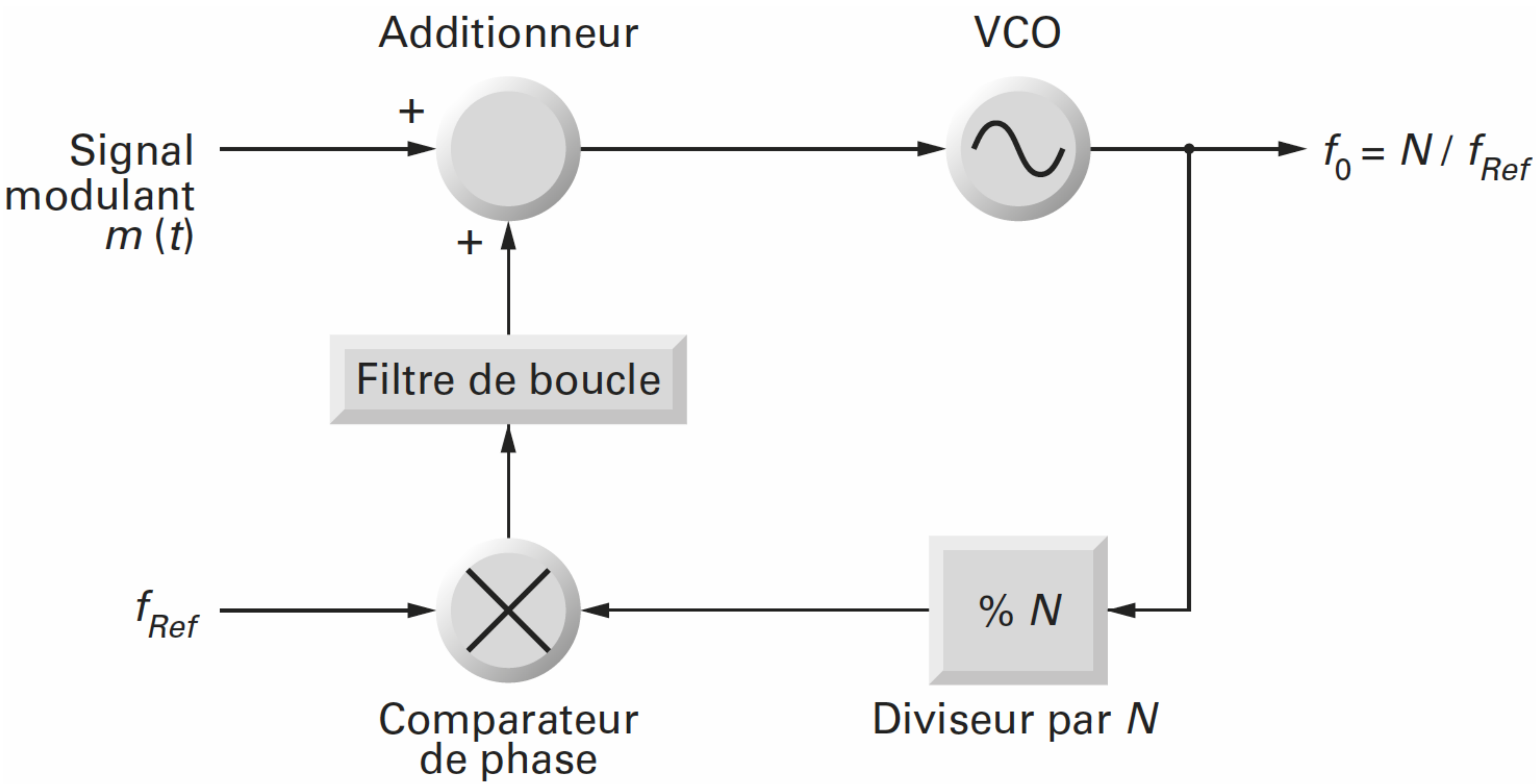
Moduladores de frecuencia por oscilador de cuarzo

Con un modo fundamental de cuarzo (hasta 30 MHz)



Moduladores

Moduladores de frecuencia por VCO y PLL



Moduladores

Demoduladores de frecuencia

Discriminador Foster-Seeley

Sea la señal de frecuencia modulada:

$$n(t) = A\sin\left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1}\sin\omega_1 t + \Phi\right)$$

Dado que la señal moduladora es senoidal, resulta:

$$m(t) = \cos\omega_1 t$$

Moduladores

Derivando la señal n(t)

$$\frac{dn(t)}{dt} = A\left(\omega + \omega_1 \frac{\Delta f}{f_1}\cos\omega_1 t\right)\cos\left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1}\sin\omega_1 t + \Phi\right)$$

La señal resultante sigue siendo una señal de frecuencia modulada cuya envolvente es una función lineal de la señal de modulación m (t).

Para recuperar el mensaje original enviada, es suficiente con medir la envolvente de esta señal.

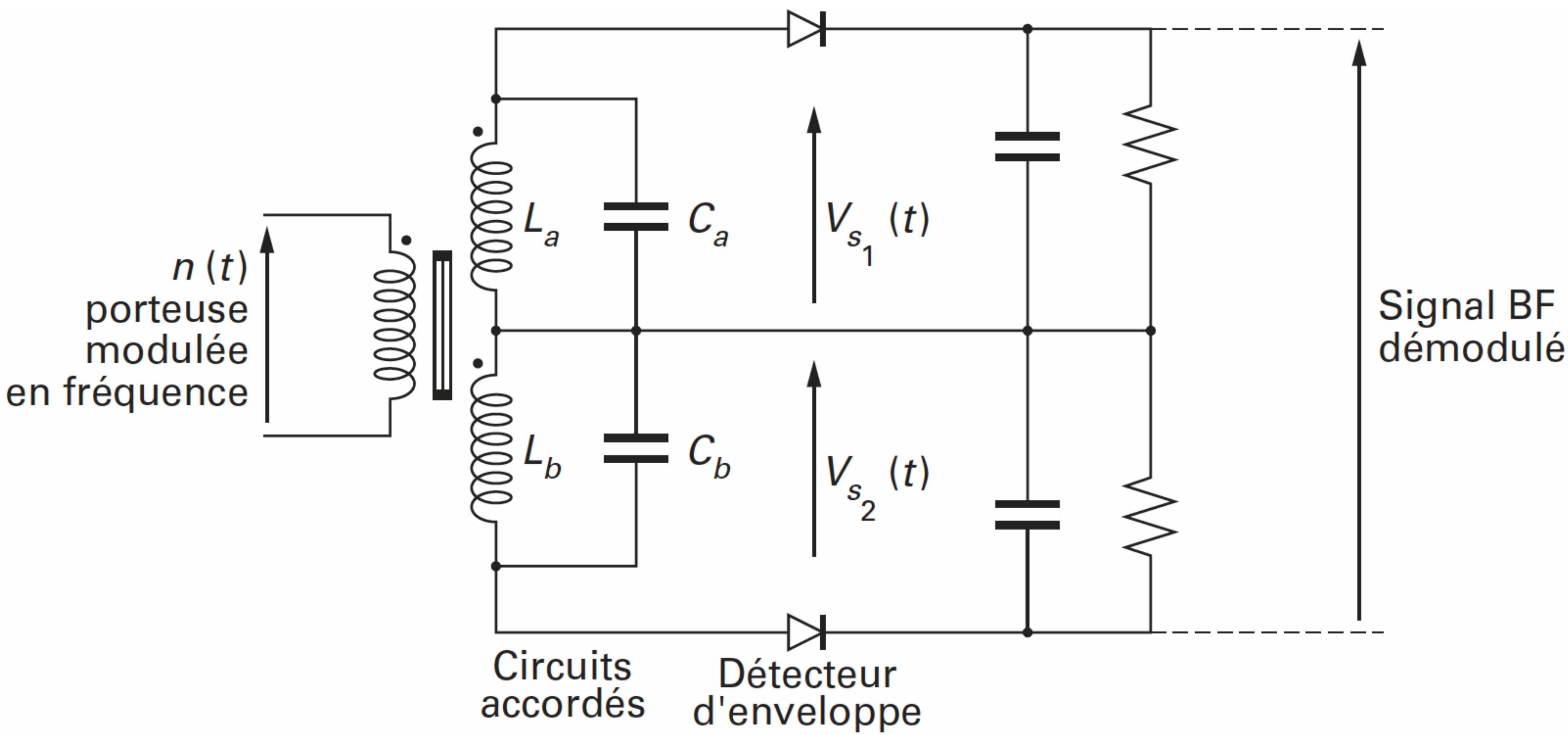
Moduladores

Por lo tanto se puede utilizar un método análogo al de la envolvente de detección de modulación de amplitud.

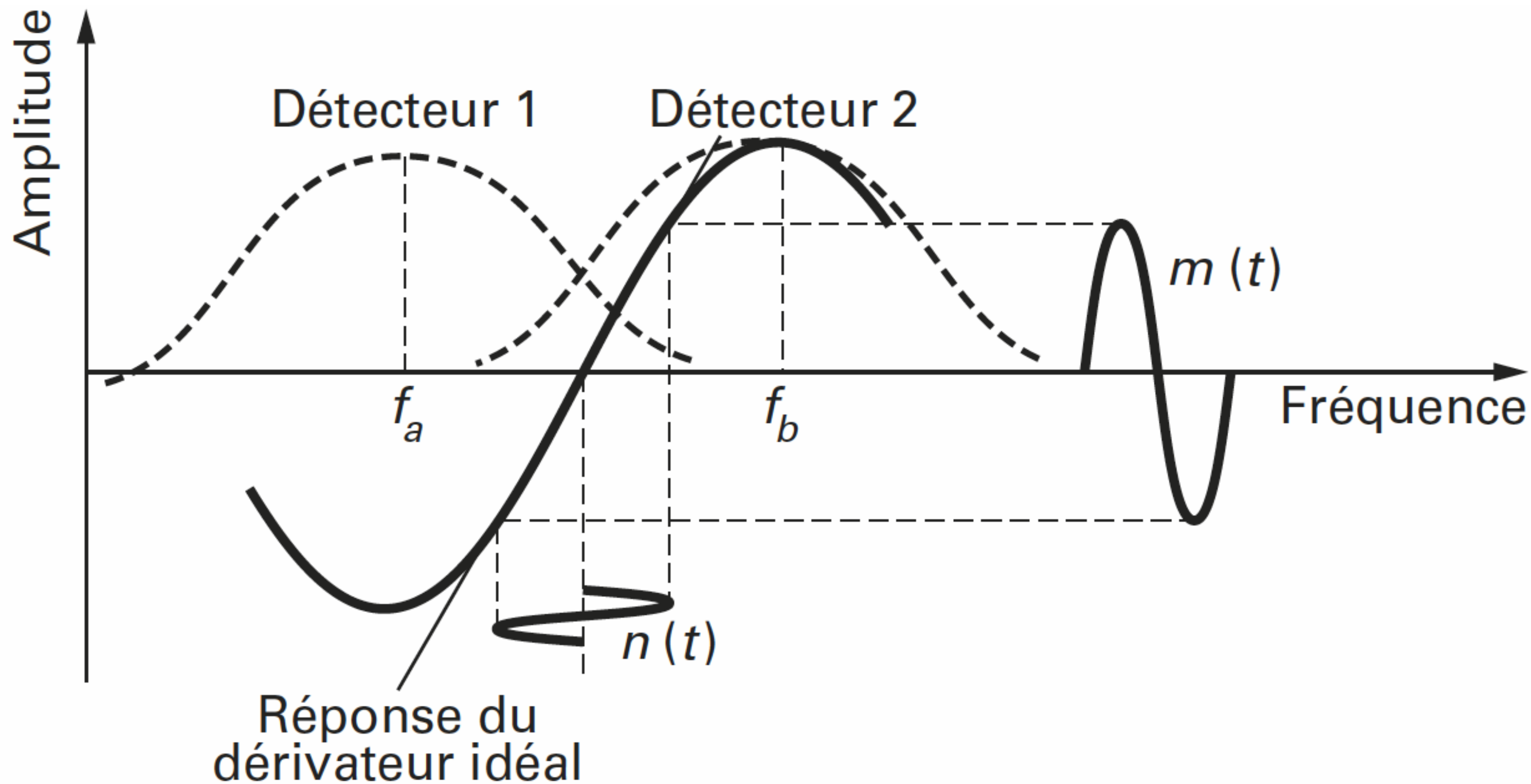
En la Fig. 7.65, el circuito LaCa está sintonizado a la frecuencia fa y circuito LbCb se sintoniza a la frecuencia fb

Las frecuencias fa y fb están desfasadas y son simétricas con respecto a la frecuencia f, la frecuencia portadora.

Moduladores



Moduladores



Discriminador en cuadratura

Sea la señal de frecuencia modulada:

$$n(t) = A\sin\left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1}\sin\omega_1 t\right)$$

Esta señal se encuentra retardada en un valor θ

$$n_1(t) = A\sin\left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1}\sin\omega_1 t + \theta\right)$$

Moduladores

El mezclador efectúa el producto de las señales n(t) y n1(t)

$$s(t) = n(t)\,n_1(t)$$

$$s(t) = A^2 \sin\left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1}\sin\omega_1 t\right)\sin\left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1}\sin\omega_1 t + \theta\right)$$

$$s(t) = \frac{A^2}{2}\left[\cos\theta - \cos\left(2\omega t + 2\frac{\Delta f}{f_1} + \theta\right)\right] \qquad \theta = -\frac{\pi}{2} + \alpha\, m(t)$$

$$s(t) = \frac{A^2}{2}\left[\cos\left(-\frac{\pi}{2} + \alpha\, m(t)\right)\right] = -\frac{A^2}{2}\sin\left[\alpha\, m(t)\right]$$

Moduladores

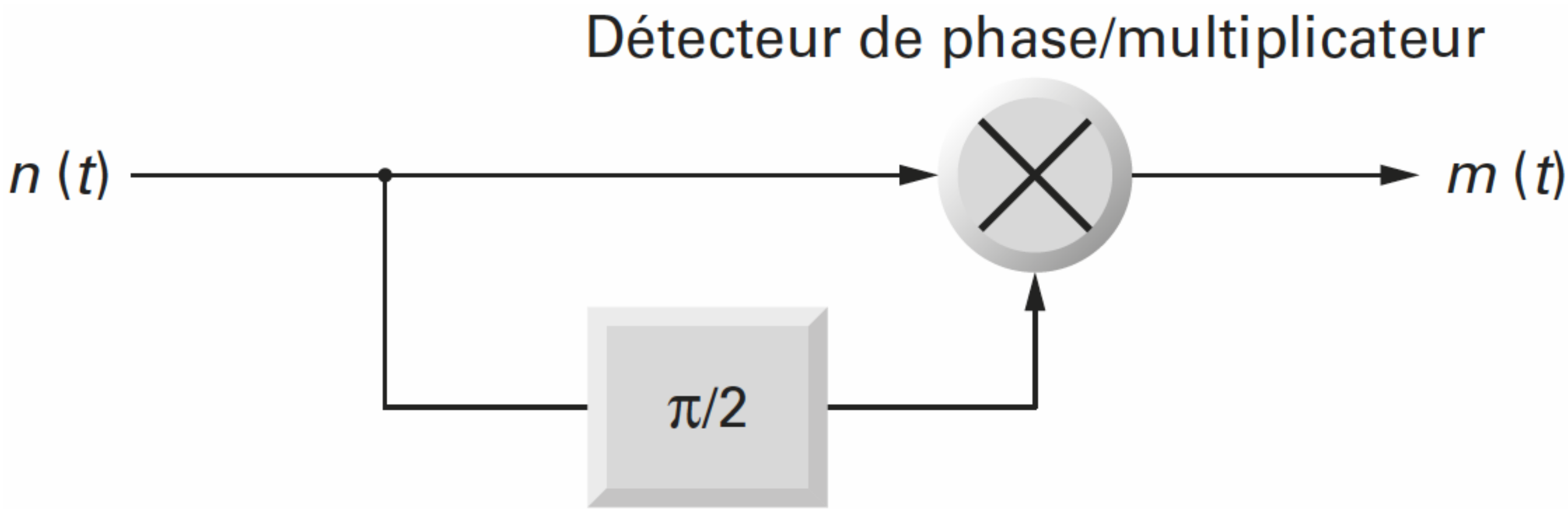
$$s(t) = \frac{A^2}{2}\left[\cos\left(-\frac{\pi}{2} + \alpha\, m(t)\right)\right] = -\frac{A^2}{2}\sin\left[\alpha\, m(t)\right]$$

Todas las variaciones están próximas a $\pi / 2$.

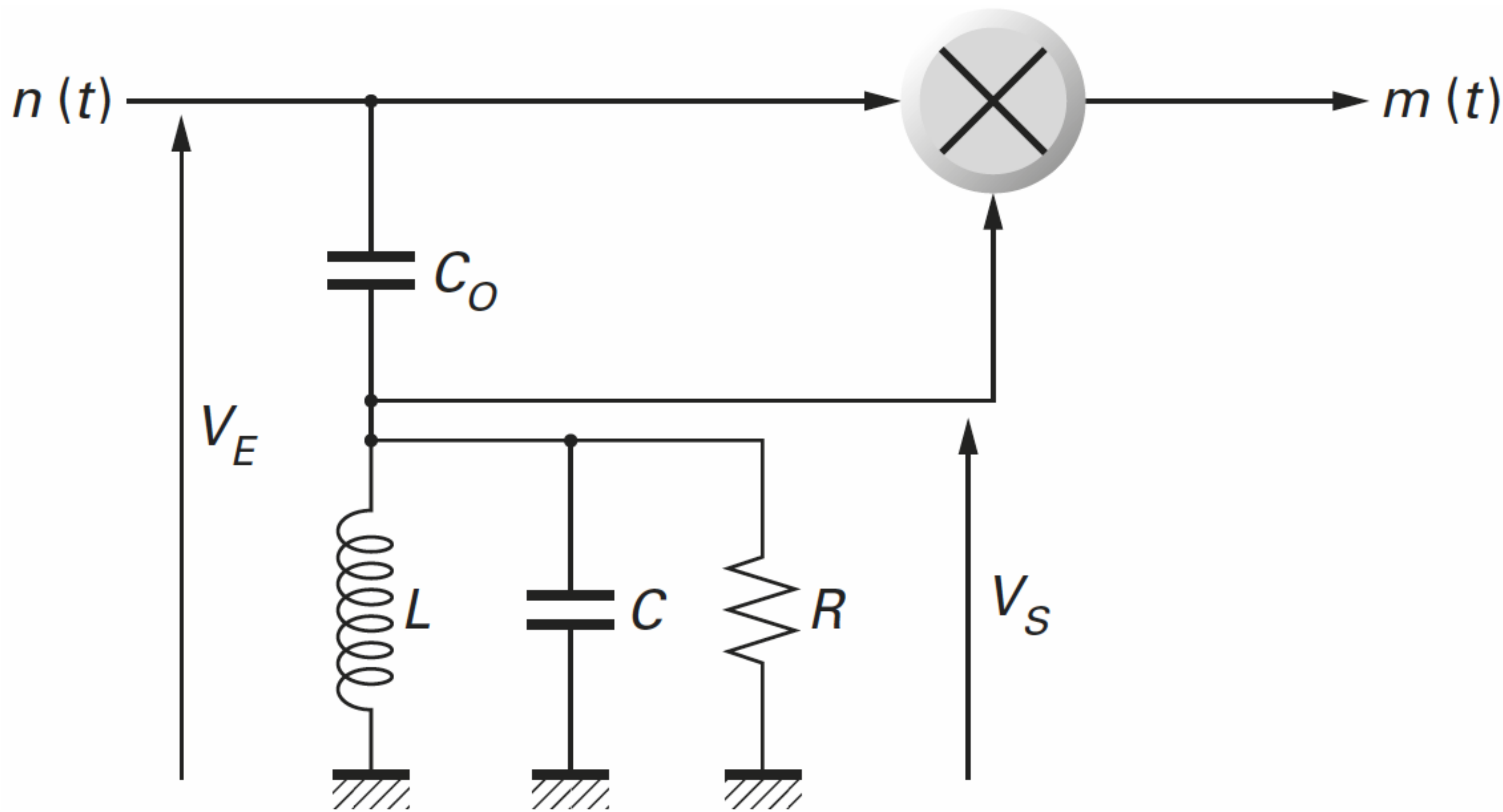
Por lo tanto, el término α m(t) es pequeño.

$$s(t) \approx -\frac{A^2}{2}\alpha\, m(t)$$

Moduladores



Moduladores



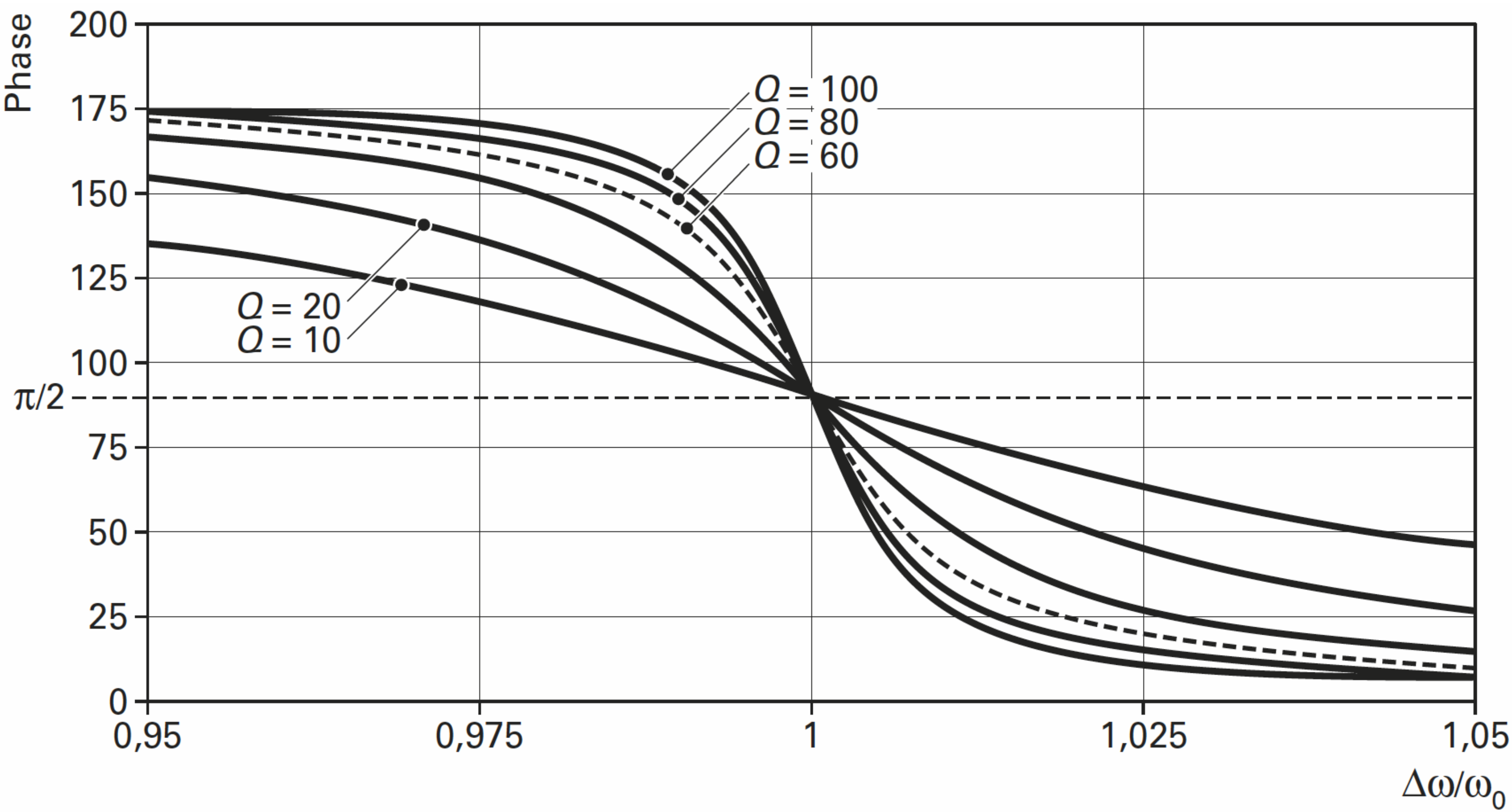
Moduladores

$$\frac{V_s(s)}{V_E(s)} = \frac{C_0}{C+C_0} \frac{L\left(C+C_0\right)s^2}{L\left(C+C_0\right)s^2 + \frac{L}{R}s + 1} = \frac{C_0}{C+C_0} \frac{s^2/\omega_0^2}{s^2/\omega_0^2 + \frac{1}{Q}\frac{s}{\omega_0} + 1}$$

La Fase buscada es

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} + \frac{2Q\left(\omega - \omega_0\right)}{\omega_0} = -\frac{\pi}{2} + 2Q\frac{\Delta f}{f_0}$$

Moduladores

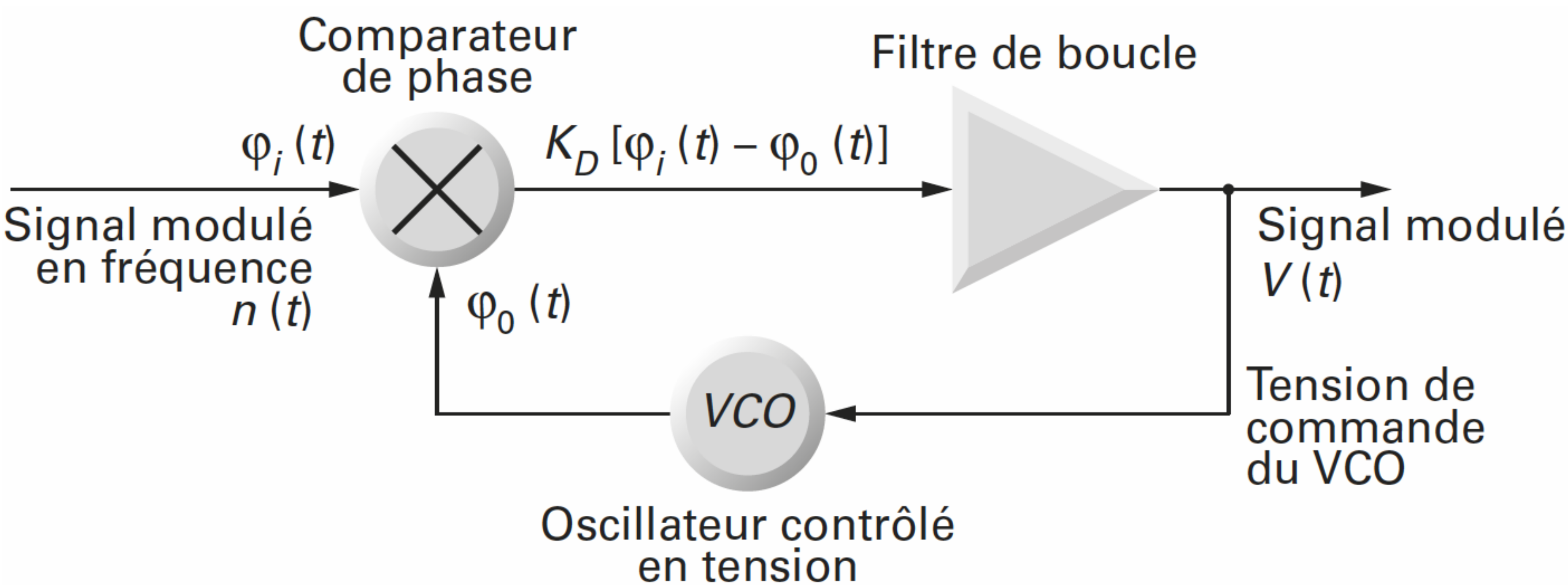


Moduladores

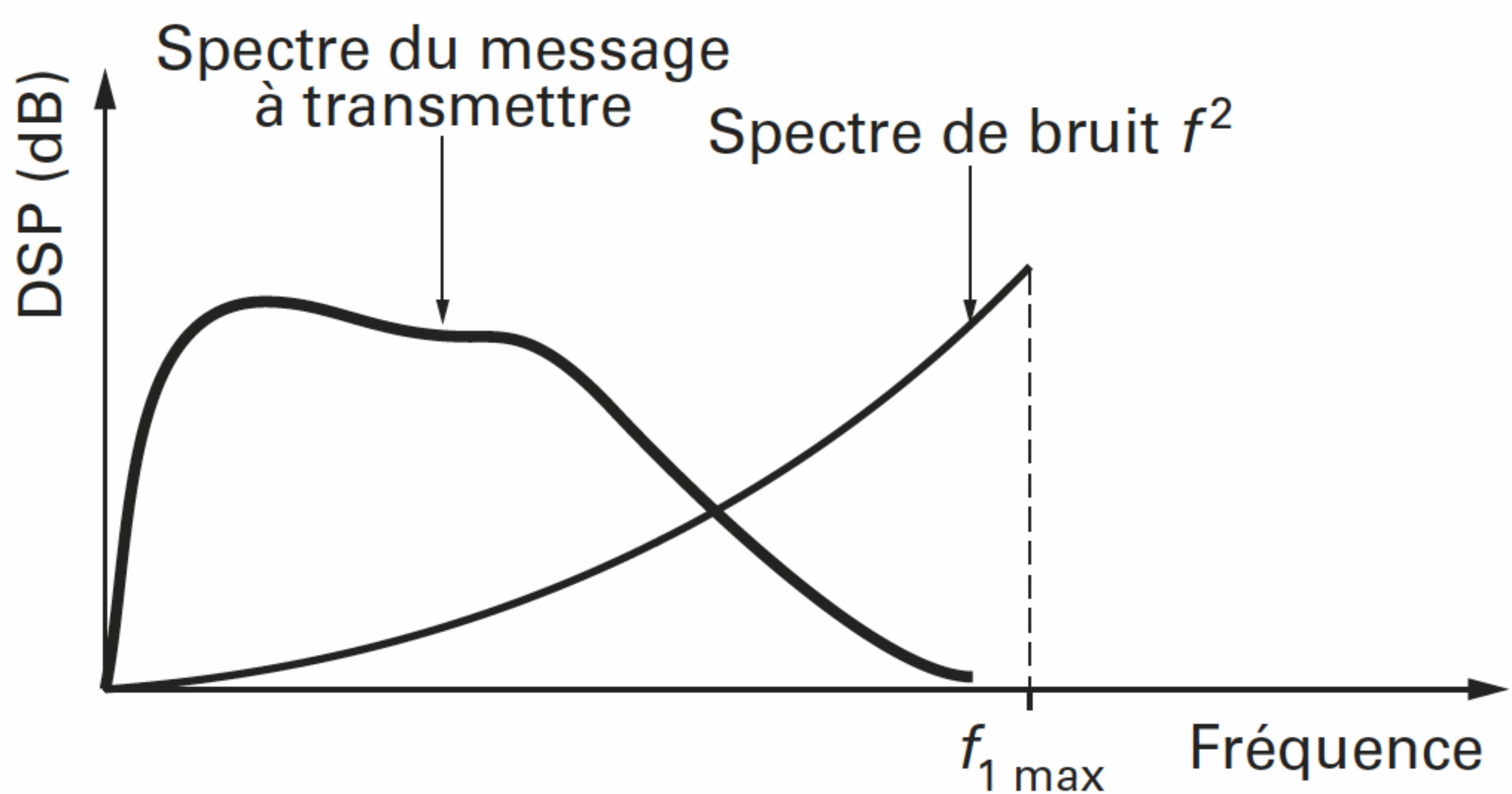
Demodulador PLL

la portadora se desplaza entonces a partir de su valor central, y si el modulador es lineal, el desplazamiento de frecuencia es proporcional a la componente de corriente continua.

Moduladores

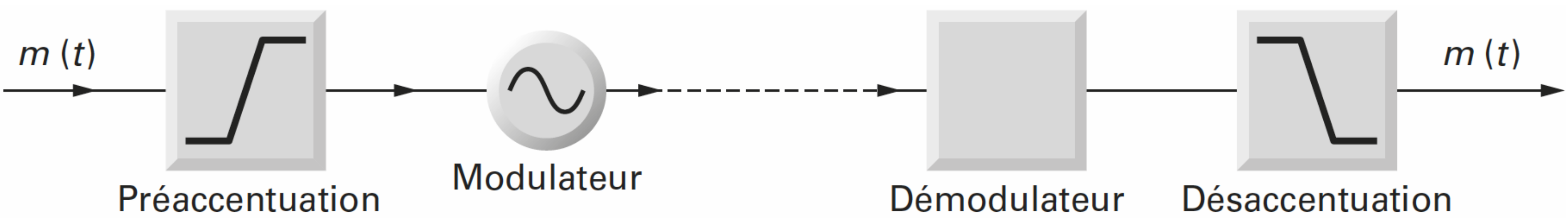


Pre-énfasis y de-énfasis



Espectro de ruido y mensaje real a la salida de un demodulador de FM

Moduladores

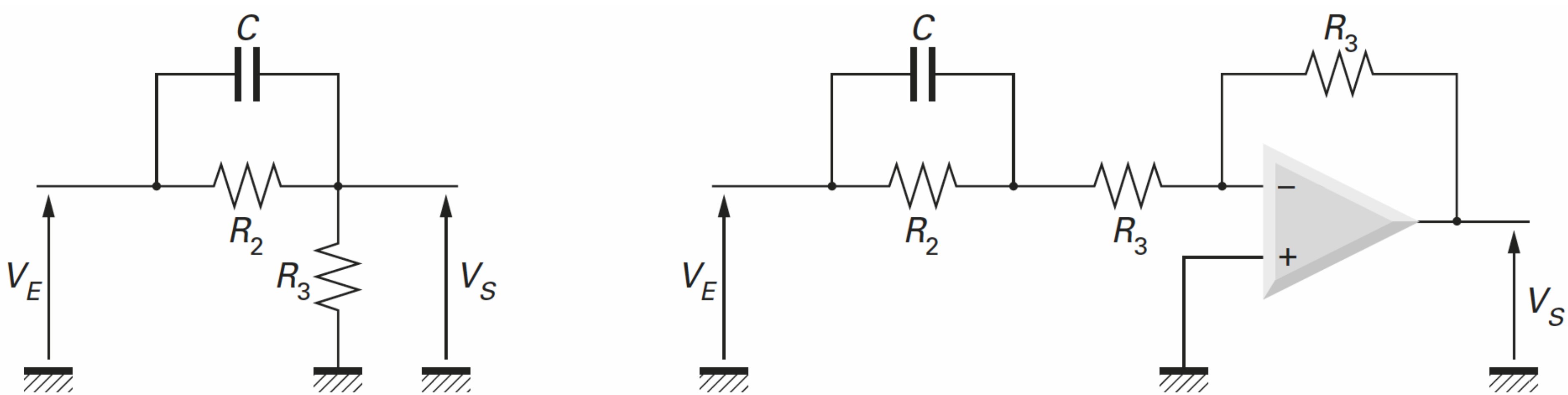


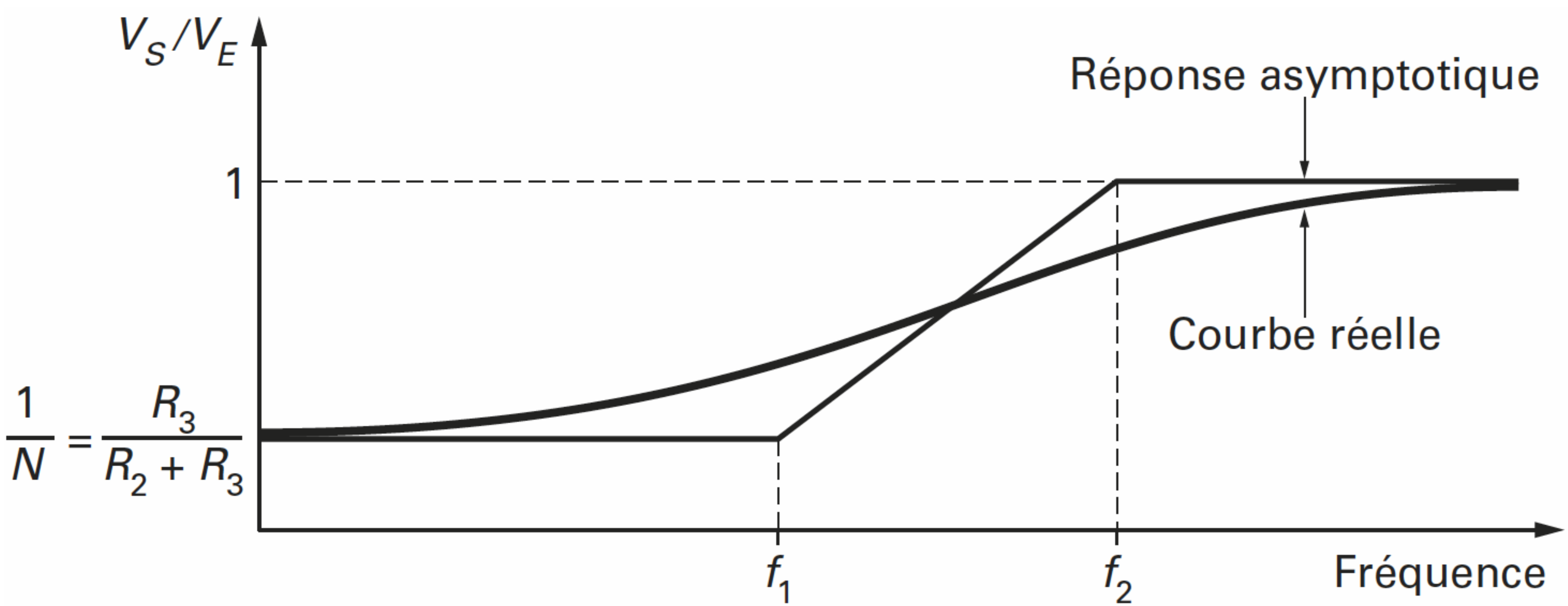
Pre-énfasis y de-énfasis

En el caso de radiodifusión acústica, la constante de tiempo R2C es de 50us .

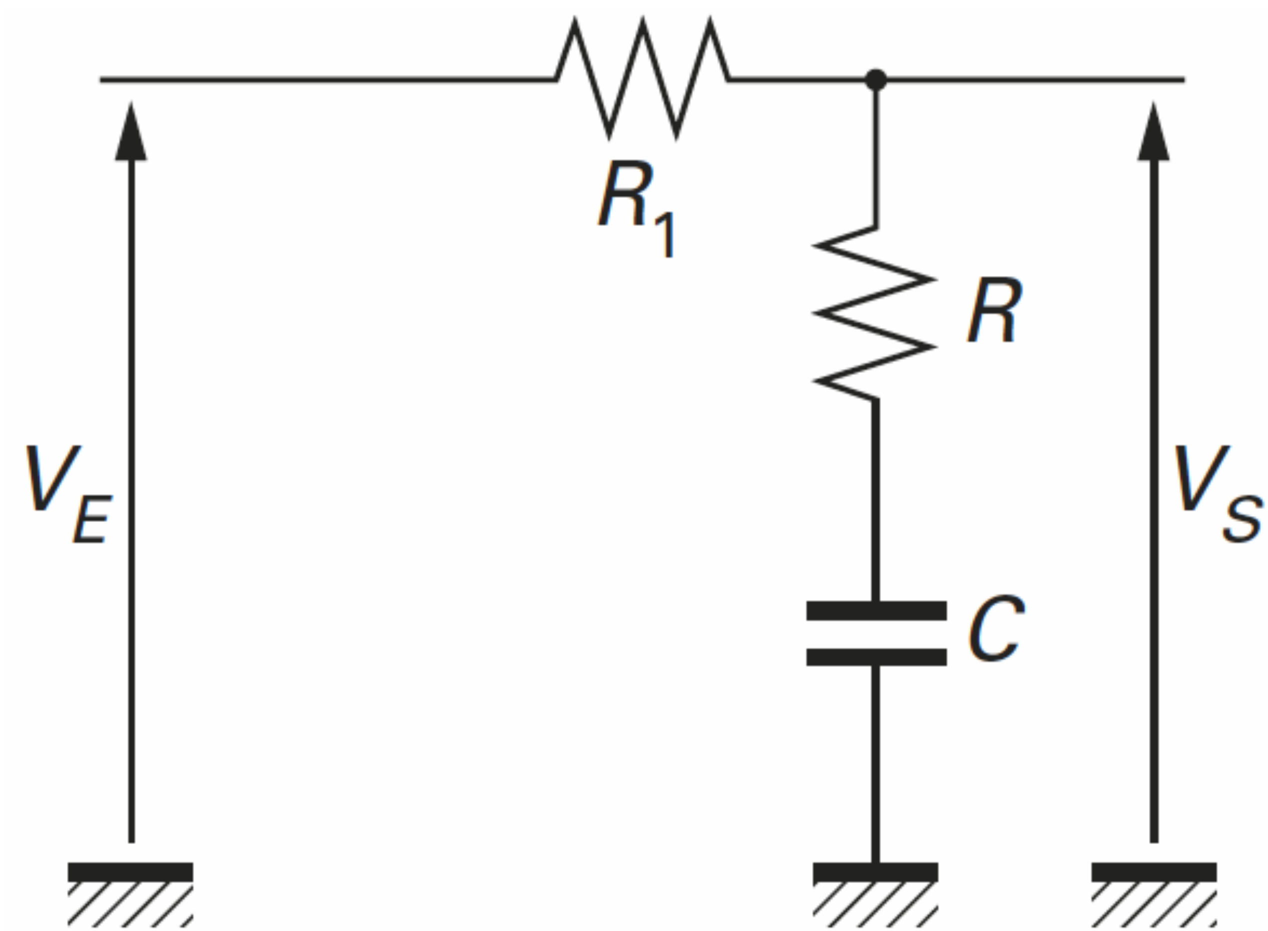
Moduladores

PREENFASIS

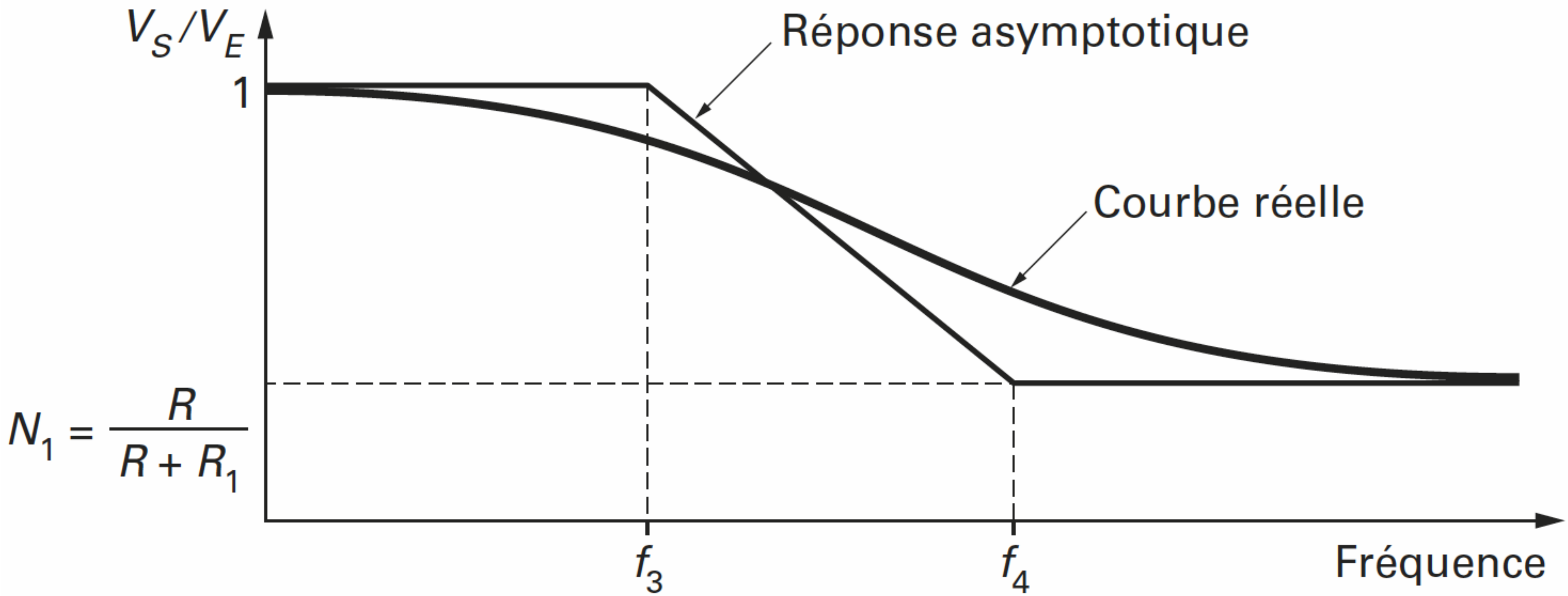




DEENFASIS



Moduladores



Moduladores

Tabla comparativa delas características de las modulaciones analógicas

	Rapport S/B	Encombrement spectral bande de base f_{1max}	Complexité modulateur	Ampli de sortie	Étage d'amplification FI en réception	Complexité démodulation	Applications
AM DBSP	1	$2f_{1max}$	simple : un mélangeur équilibré	A	C.A.G	moyenne réception cohérente	multiplex stéréo FM chrominance PAL NTSC
AM BLU	1	f_{1max}	complexe pour obtenir d'excellentes performances	A	G.A.G.	complexe	téléphonie par satellite radio-amateur
AM DBAB	$\dfrac{m_A^2}{2+m_A^2}$	$2f_{1max}$	simple mélangeur équilibré	A	C.A.G.	simple - réception cohérente - redressement	radiodiffusion qualité moyenne BW $<$ 5 KHz G.O/O.M/O.C
AM BLR	1	$\approx f_{1max}$	assez simple	A	C.A.G.	simple - réception cohérente - redressement	transmission télévision
FM	$3\,m_F^2$	$2(m_F+1)f_{1max}$	simple - VCO - *PLL*	C	limiteurs	simple - discriminateur à quadrature - *PLL*	radiodiffusion audio télévision par satellite

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores

Moduladores