



E1214 Fundamentos de las Comunicaciones

E0214 Comunicaciones

E0311/E1311 Comunicaciones

Curso 2024

Temas a tratar

- Modulación
- Doble Banda Lateral
- AM
- Transformada Hilbert. BLU
- Modulación IQ

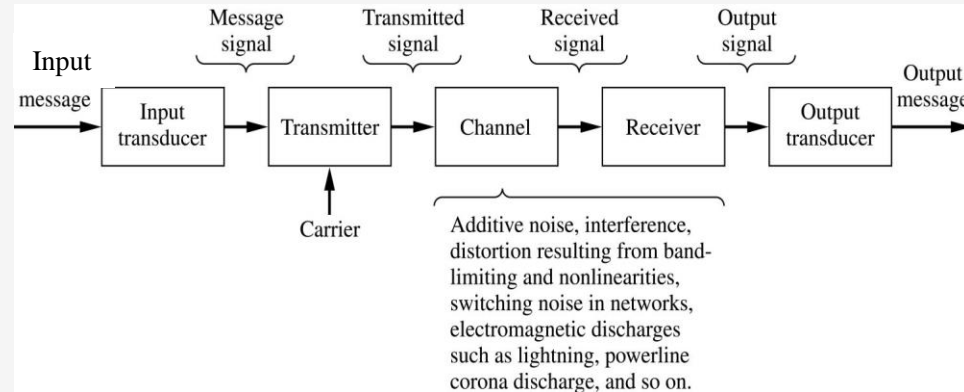
Los llamados "Locos de la Azotea", quienes hace 104 años realizaron la primera transmisión de radiodifusión desde la terraza del Teatro Coliseo de Buenos Aires



27 de agosto de 1920

Modulación. ¿Por qué?

Variar parámetros de alguna señal en función del mensaje que se desea transmitir



- Adaptar las características de la señal que llevará la información del mensaje, al canal.
- Necesidad de transmitir mensajes diferentes por el mismo canal.
- Si es canal es el aire, para poder tener tamaños razonables para las antenas.

Sistemas de Modulación Analógicos:

Modulación de Onda Continua

Modulación de Pulsos

Modulación de Onda Continua

$$X(t) = \text{Re}\{A(t) e^{j2\pi f_p t + \phi(t)}\}$$

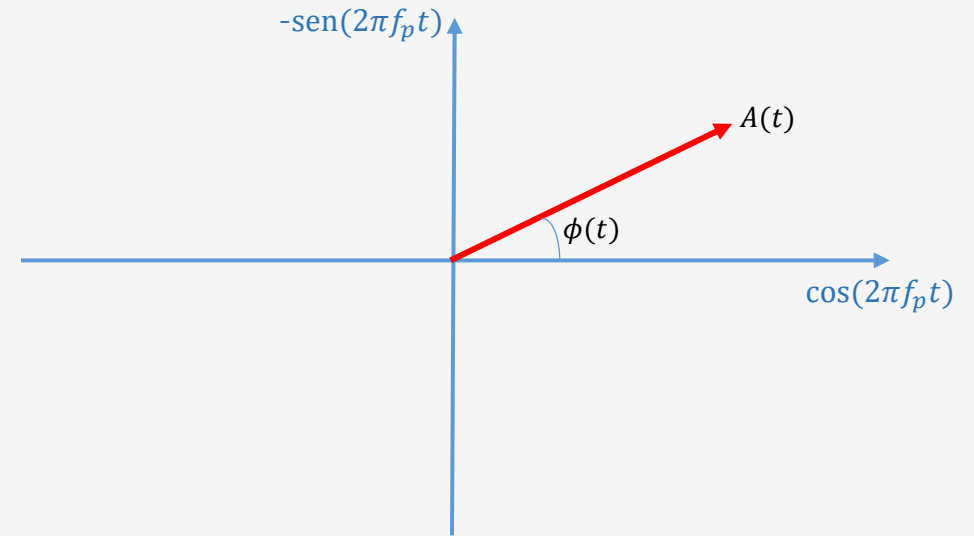
$$X(t) = A(t) \cos(2\pi f_p t + \phi(t))$$

$A(t)$: amplitud

f_p : frecuencia de portadora (carrier)

$\varphi(t) = 2\pi f_p t + \phi(t)$ $\phi(t)$: desviación de fase

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = f_p + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$$

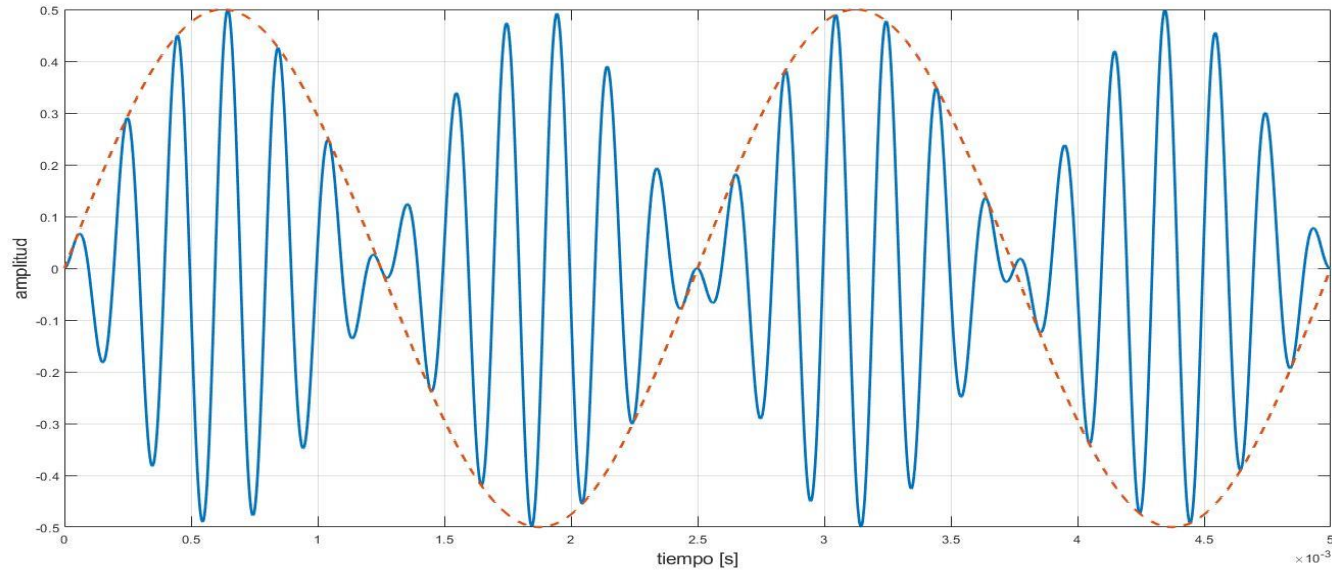
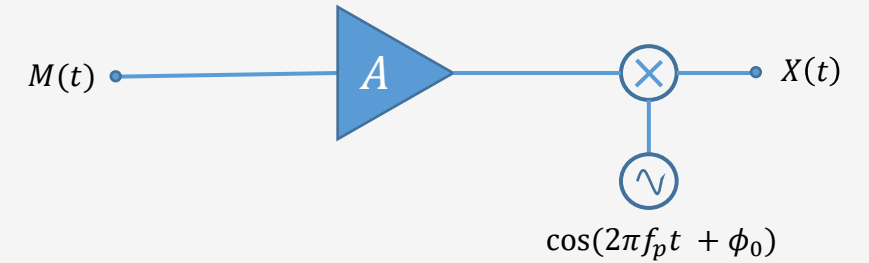


- Modulación de amplitud
- Modulación de fase/frecuencia
- Modulación IQ (amplitud - fase)

DBL (DSB-SC)

$$A(t) = A M(t) \longrightarrow X(t) = A M(t) \cos(2\pi f_p t + \phi_0)$$

$M(t)$: mensaje a Tx



DBL (DSB-SC)

Objetivo: DEP

Supongamos $M(t)$ PAESA real, de media nula, potencia P_M y $\phi_0 = 0$

$$R_{XX}(t + \tau, t) = E\{X(t + \tau)X^*(t)\} = A^2 R_{MM}(\tau) \cos(2\pi f_p(t + \tau)) \cos(2\pi f_p t)$$

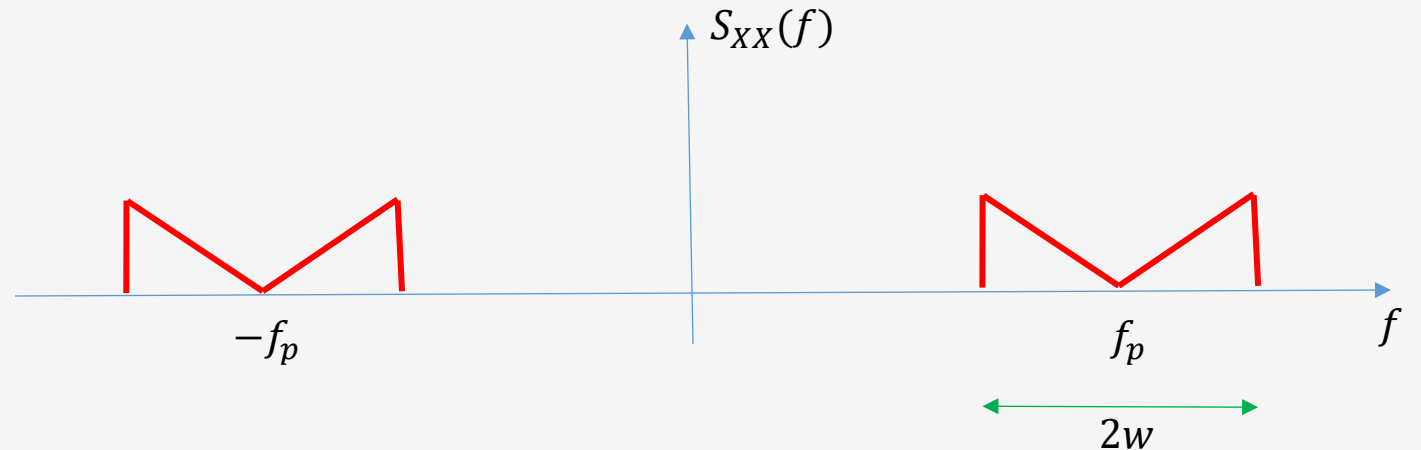
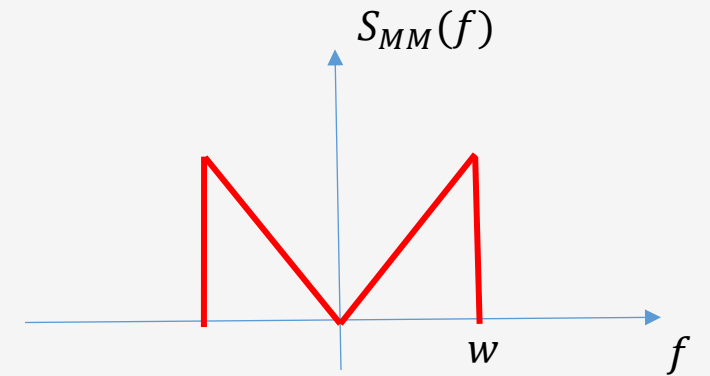
$$S_{XX}(f) = \mathcal{F}\{\langle R_{XX}(t + \tau, t) \rangle\} = \mathcal{F}\left\{\frac{A^2}{2} R_{MM}(\tau) \cos(2\pi f_p \tau)\right\}$$

$$S_{XX}(f) = \frac{A^2}{4} [S_{MM}(-(f + f_p)) + S_{MM}(f - f_p)]$$

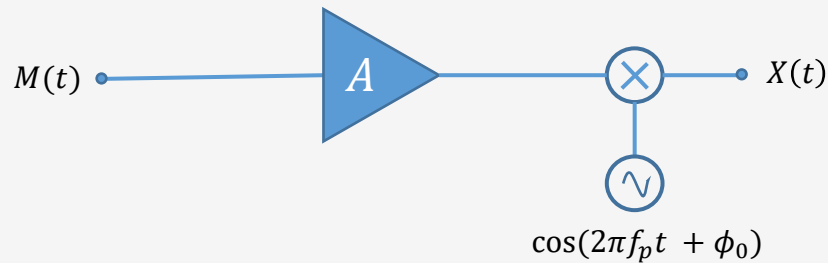
$$P_X = \frac{A^2}{2} P_M$$

Doble banda lateral

Sin potencia a la frecuencia de portadora

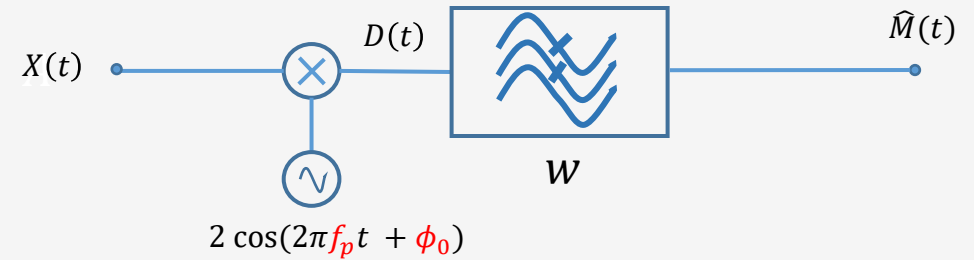


DBL (DSB-SC)



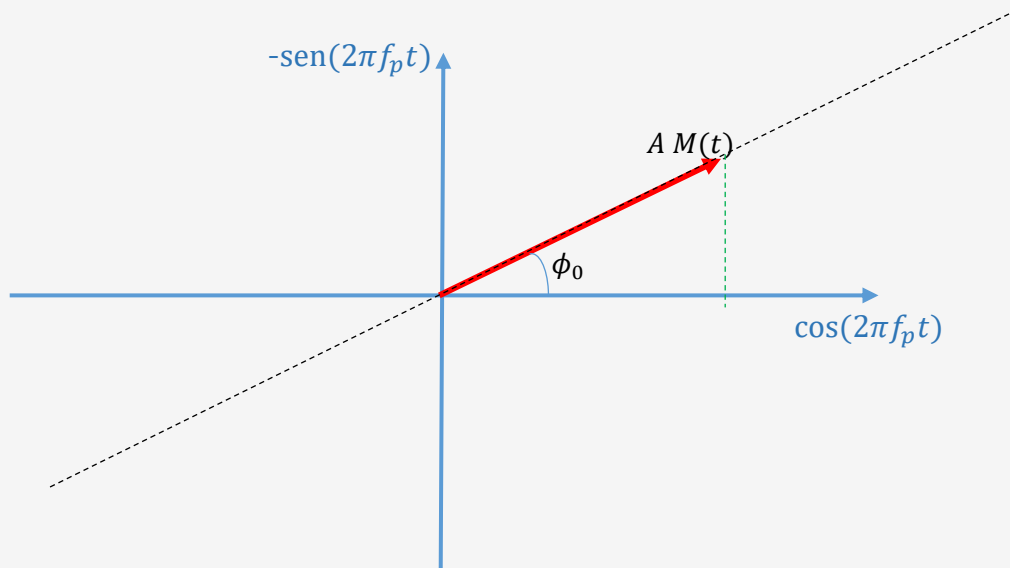
QTH FI-UNLP

**CANAL
PASABANDA
IDEAL**



**DEMODULACIÓN
COHERENTE**

QTH Adrián
Bogotá, Colombia



$$R_{DD}(t + \tau, t) = A^2 R_{MM}(\tau) [1 + \cos(2\omega_p t) + \cos(2\omega_p t + 2\omega_p \tau) + \dots + \frac{1}{2} \cos(4\omega_p t + 2\omega_p \tau) + \frac{1}{2} \cos(2\omega_p \tau)]$$

$$\langle R_{DD}(t + \tau, t) \rangle = A^2 R_{MM}(\tau) [1 + \frac{1}{2} \cos(2\omega_p \tau)]$$

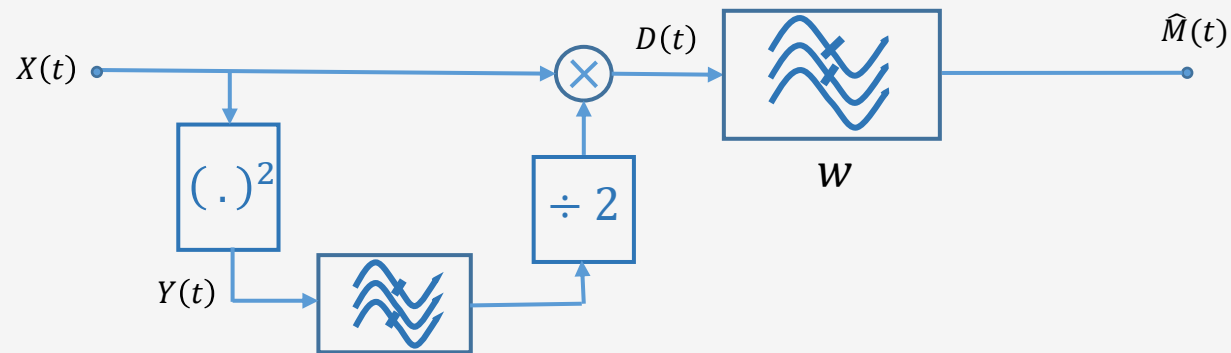
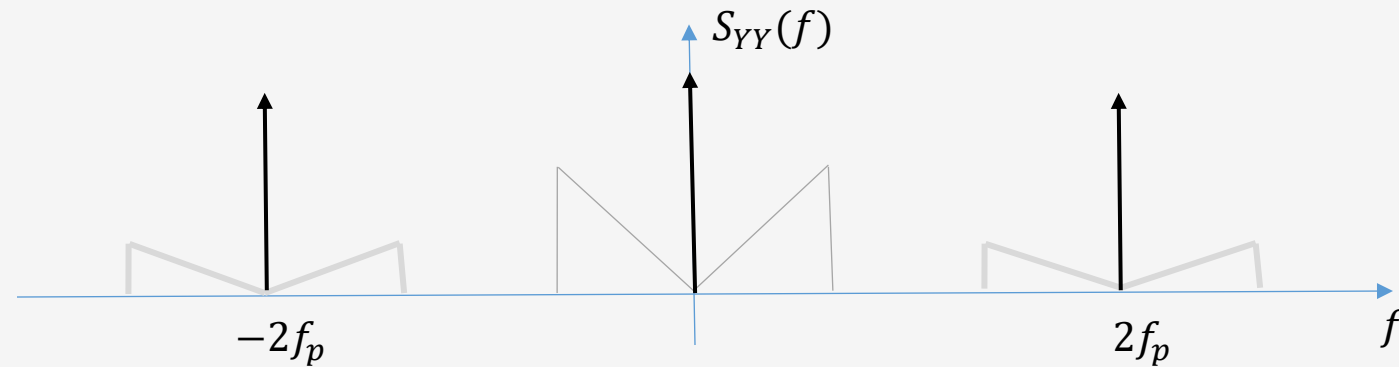
$$S_{DD}(f) = A^2 S_{MM}(f) + \frac{A^2}{4} [S_{MM}(f + 2f_p) + S_{MM}(f - 2f_p)]$$

$$S_{\hat{M}\hat{M}}(f) = S_{DD}(f) |H(f)|^2 = A^2 S_{MM}(f) \quad P_{\hat{M}} = A^2 P_M$$

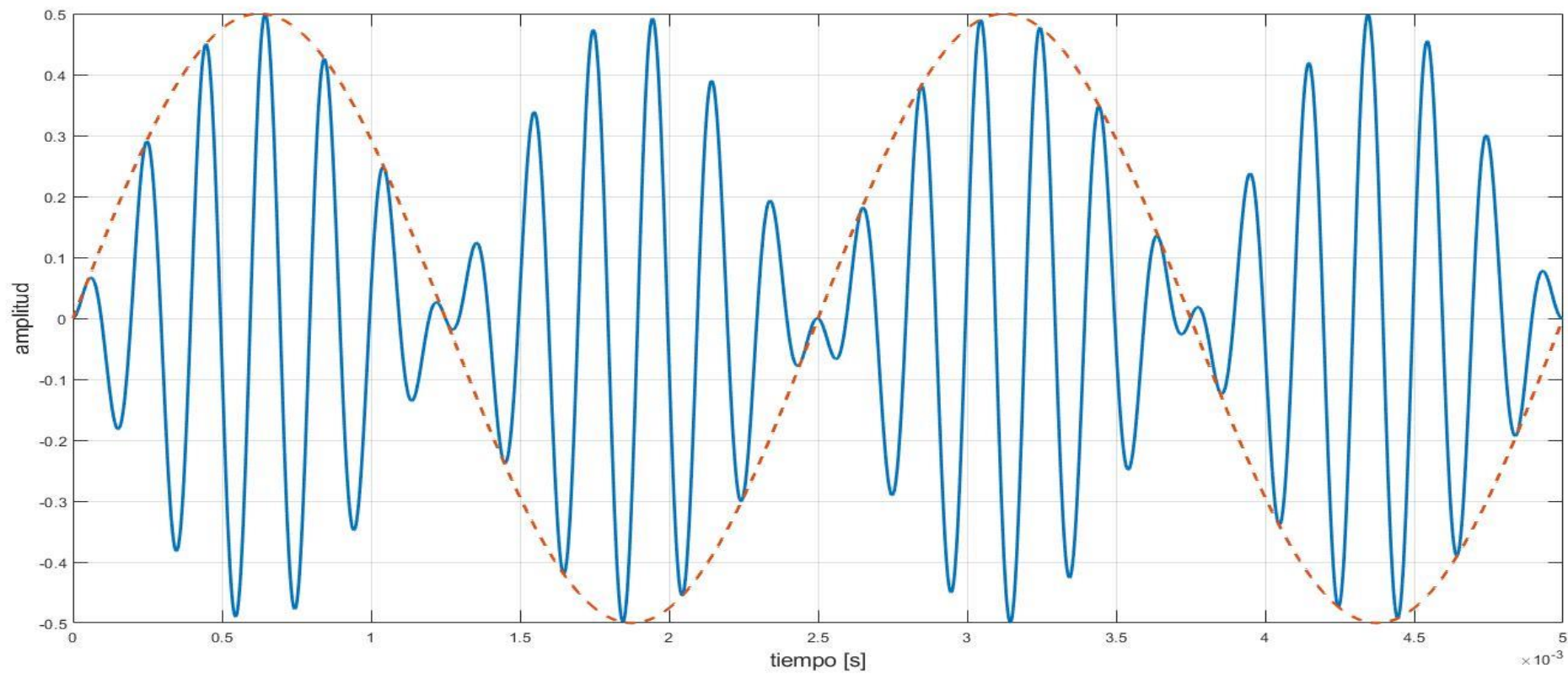
DBL (DSB-SC)

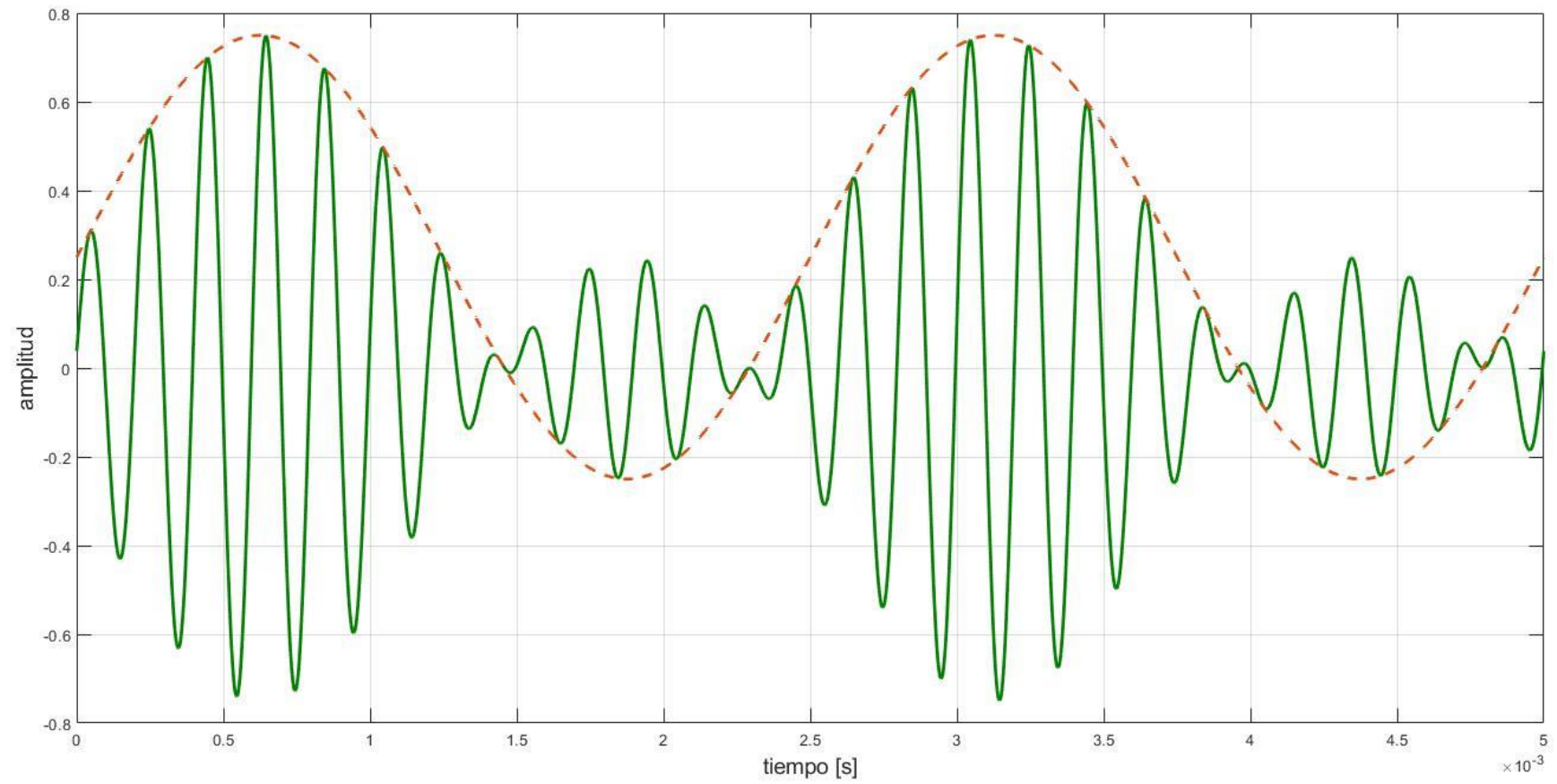
$$X(t) = A M(t) \cos(2\pi f_p t + \phi_0)$$

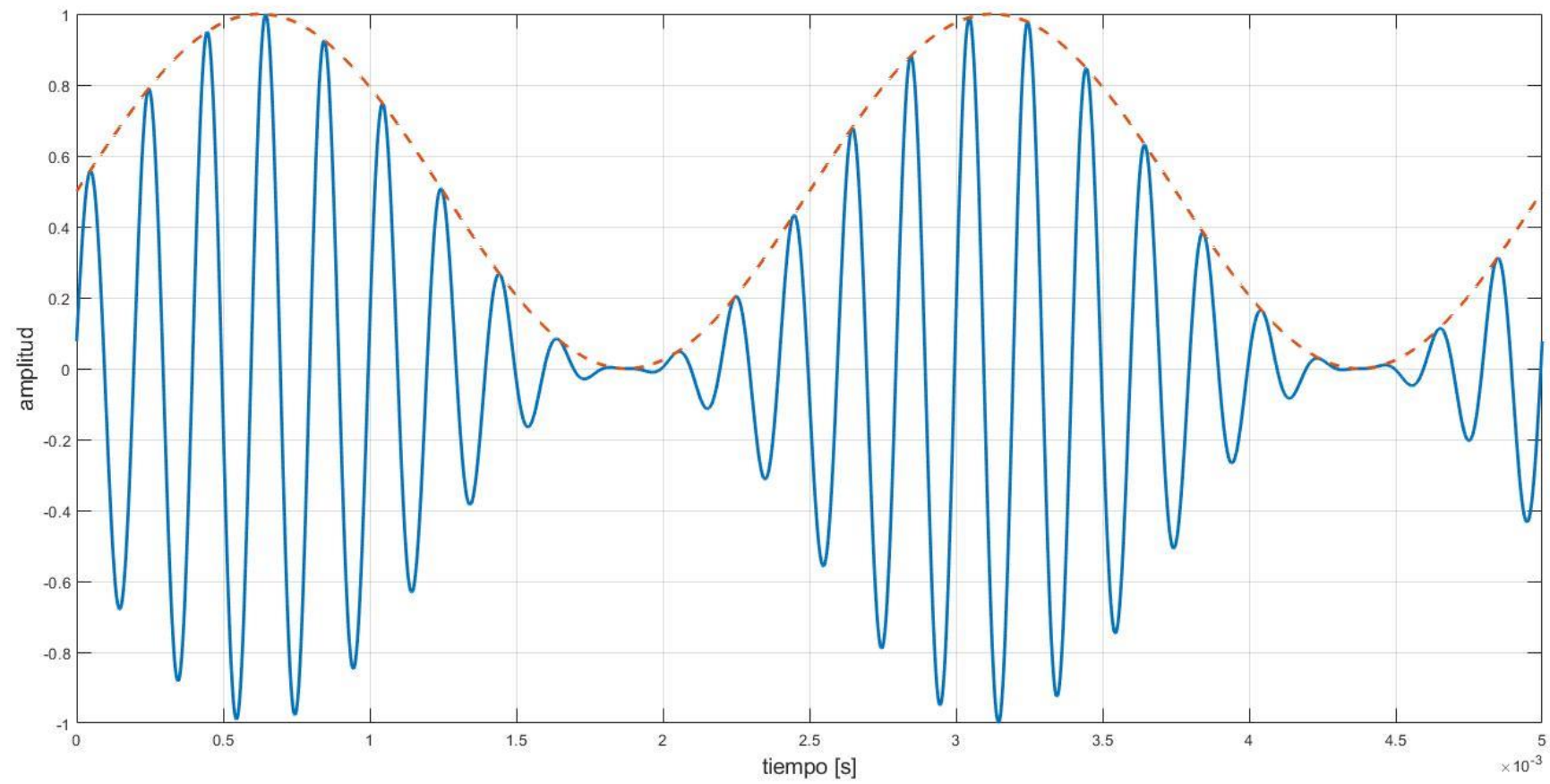
$$Y(t) = X^2(t) = A^2 M^2(t) \cos^2(2\pi f_p t + \phi_0) = \frac{A^2}{2} M^2(t) [1 + \cos(2\pi 2f_p t + 2\phi_0)]$$

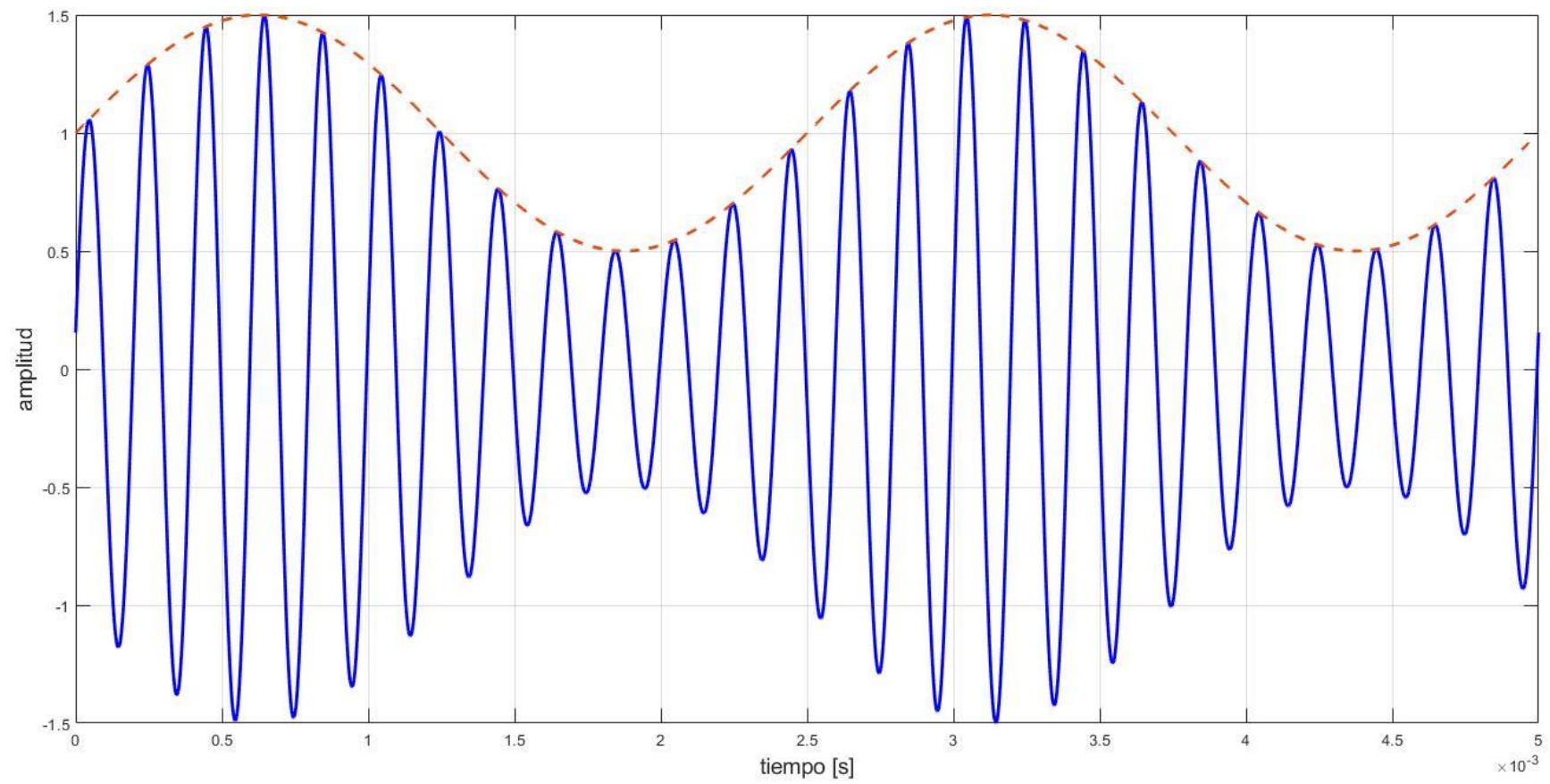


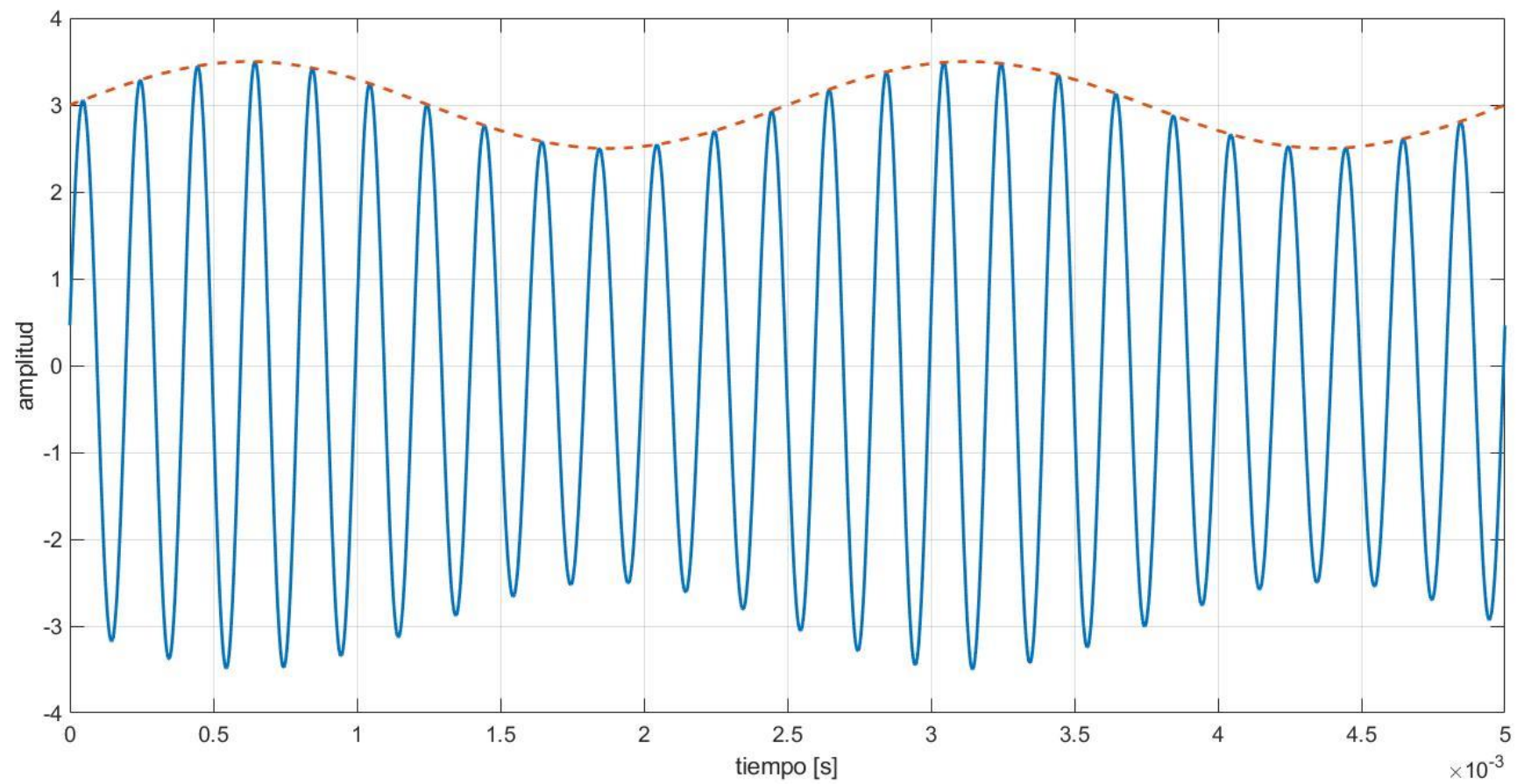
$$X(t) = A M(t) \cos(2\pi f_p t + \phi_0)$$











AM

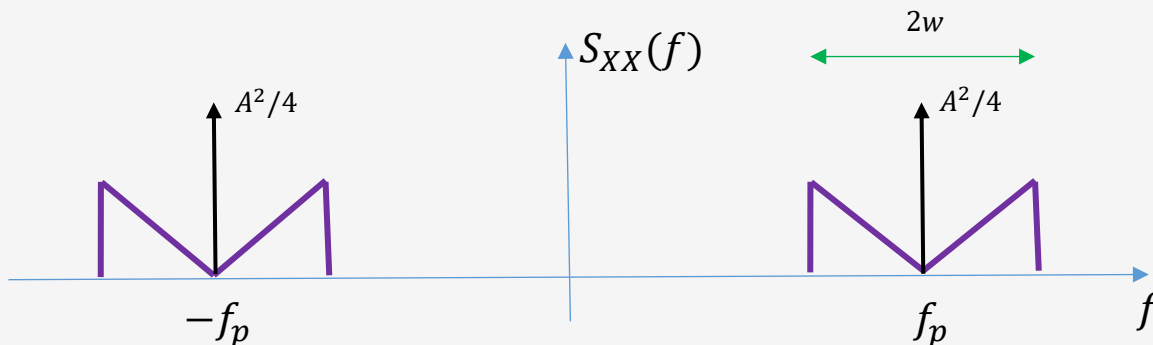
$$X(t) = A (1 + a M_n(t)) \cos(2\pi f_p t + \phi_0)$$

con $M_n(t) = \frac{M(t)}{|\min\{M(t)\}|}$

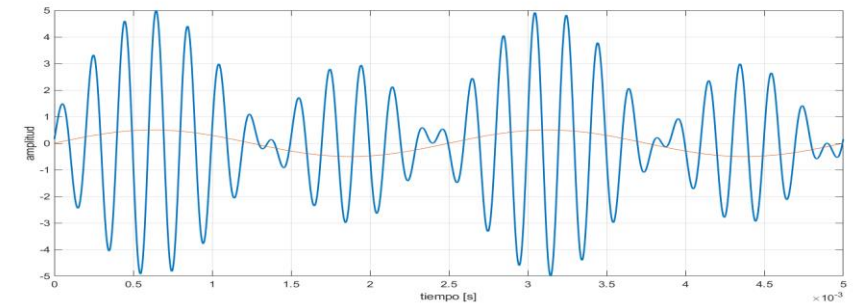
a : índice de modulación

$M(t)$ PAESA real, de media nula, $BW = w$ y potencia P_M

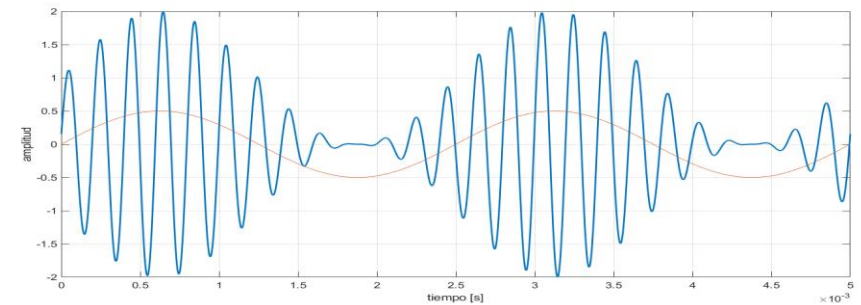
$$E_{ff} = \frac{\text{Pot. bandas laterales}}{\text{Pot. Total}} = \frac{1}{1 + 1/a^2 P_{M_n}}$$



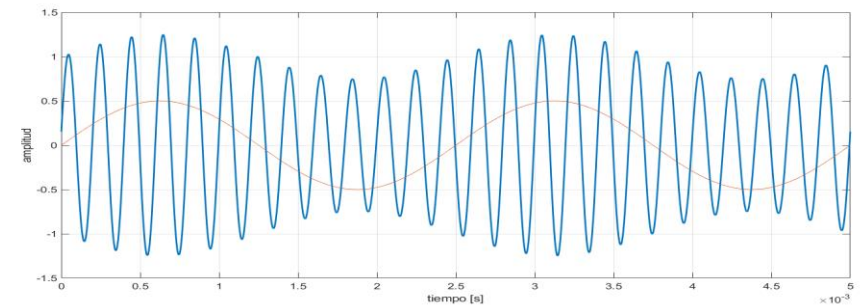
$a > 1$



$a = 1$



$a < 1$

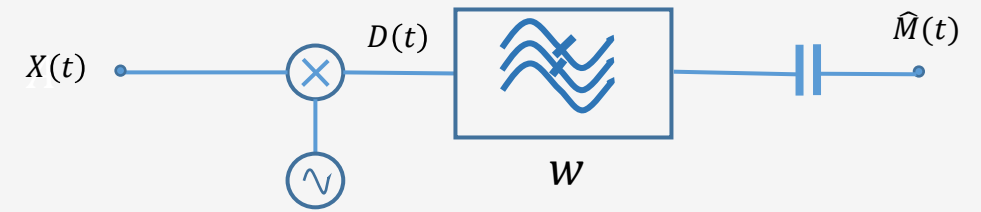


AM

$$X(t) = A (1 + a M_n(t)) \cos(2\pi f_p t + \phi_0)$$

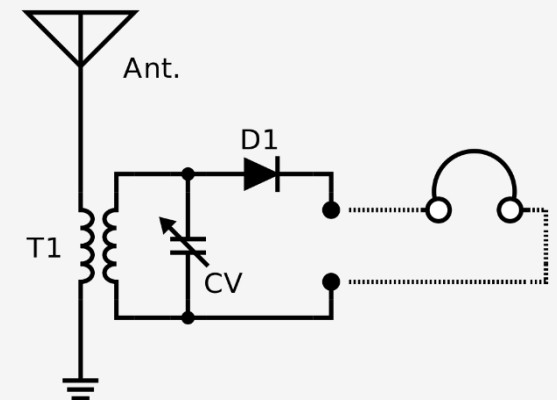
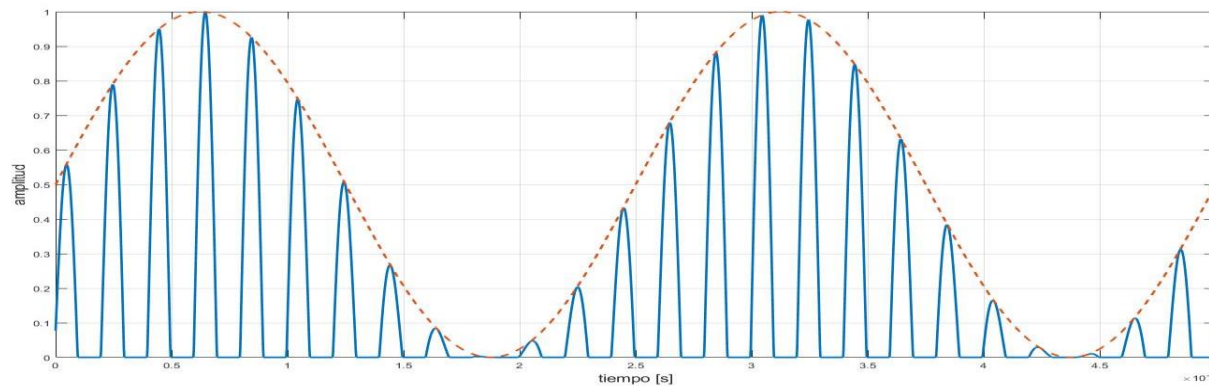
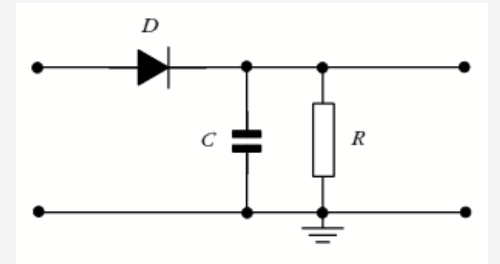
$a > 1$ \longrightarrow Demodulación coherente

$a \leq 1$ $\begin{cases} \longrightarrow \text{Demodulación coherente} \\ \longrightarrow \text{Detector de envolvente} \end{cases}$



$2 \cos(2\pi f_p t + \phi_0)$
LAZO PORTADORA

$$\omega \ll \frac{1}{2\pi RC} \ll f_p$$



Radio Universidad - UNLP



Radio Universidad Nacional de La Plata
CALLE 48 NRO 566, PISO 8 EDIFICIO KARAKACHOFF
La Plata – Buenos Aires – Argentina

$$f_p = 1390\text{kHz}$$

<https://www.radiouniversidad.unlp.edu.ar/>

LR11 Radio Universidad Nacional de La Plata, es una emisora perteneciente a la Universidad Nacional de La Plata. Fue inaugurada el 5 de abril de 1924 como elemento de divulgación científica y extensión universitaria, y se trata de la **primera radio universitaria del mundo**. La inauguración ocurrió en el salón de actos del Colegio Nacional Rafael Hernández, en conjunto con la apertura formal del ciclo lectivo de ese año. La ceremonia, encabezada por el presidente de la casa de estudios, se realizó en memoria del fundador y primer presidente de la UNLP, Dr. Joaquín Víctor González. Al principio la radio funcionó con el indicativo LOP en una frecuencia de 685 kHz. La planta transmisora también estaba ubicada en los terrenos del Colegio, en donde se habían acondicionado dos aulas y el salón de actos para el funcionamiento de la radio. Años después, cambió su identificación por LT2 y más tarde tomó la sigla definitiva de LR11 y se le adjudicó la frecuencia de 1390 kHz.



Uno de los primeros equipos experimentales de radiodifusión

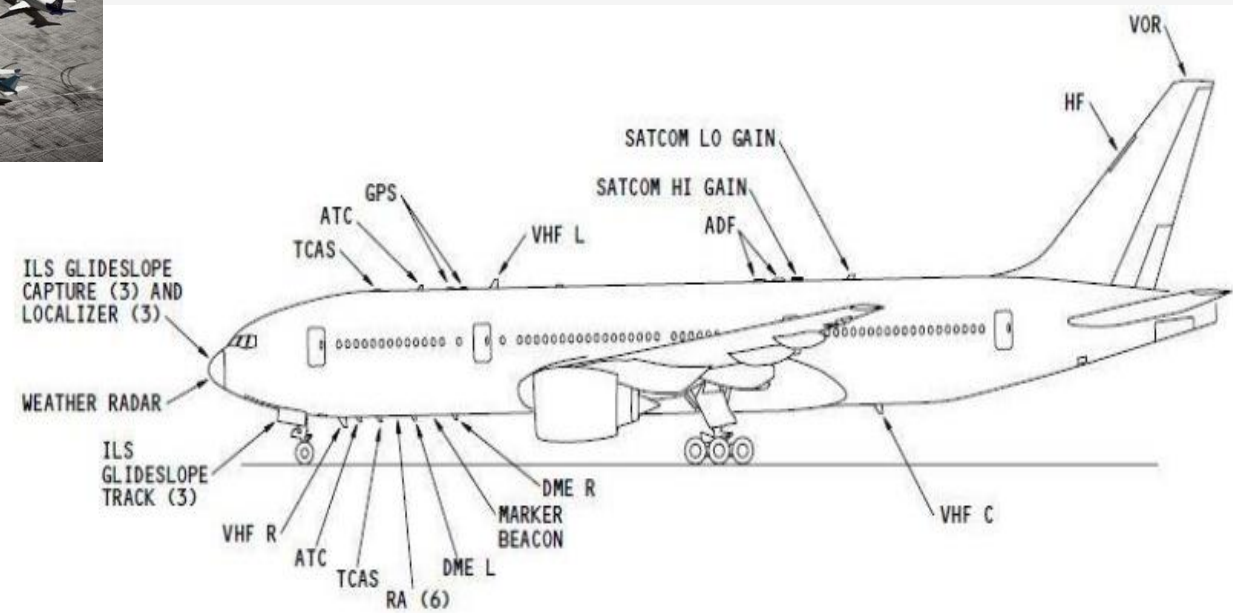


Banda Aeronáutica - AM

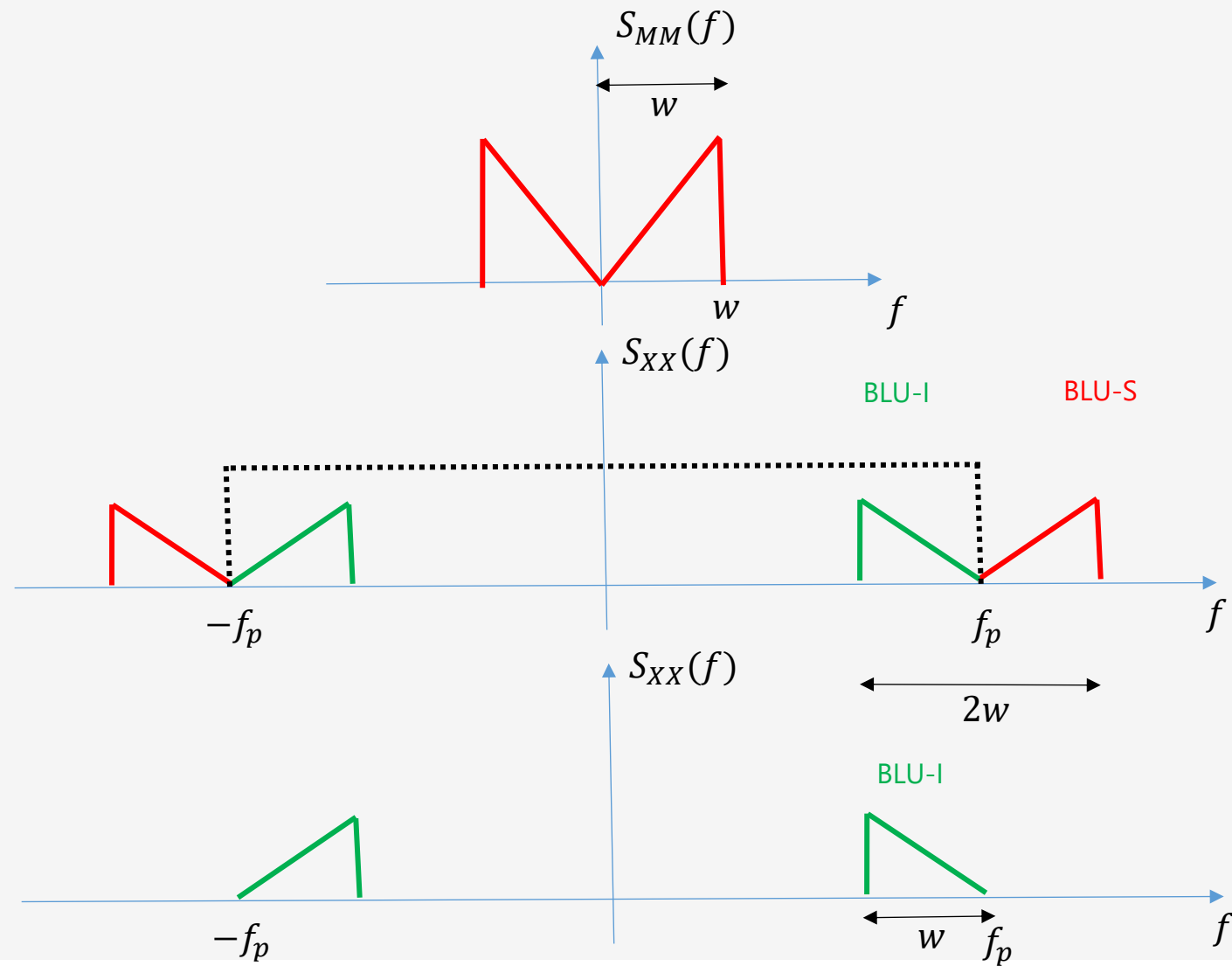


Banda aeronáutica (voz):

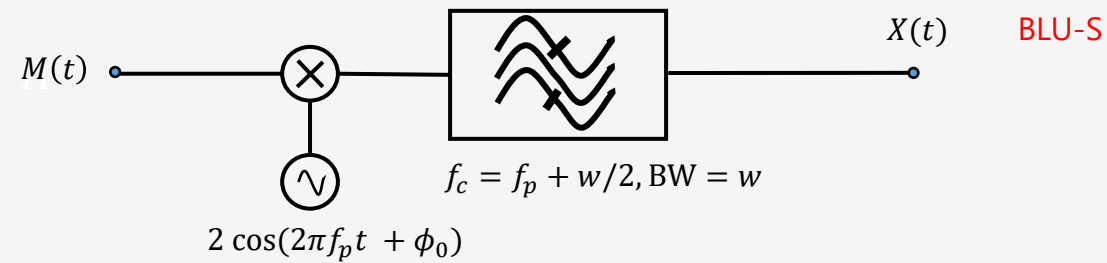
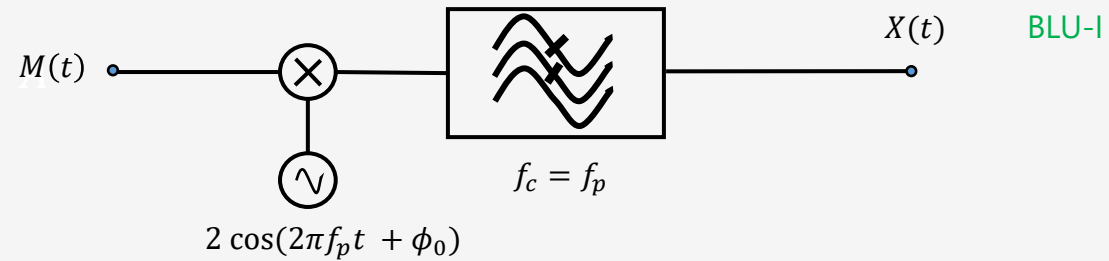
118-136.975 MHz,
BW= 25kHz, AM



BLU (SSB)



BLU – por filtrado



Problema filtros ideales

Orden muy grande, ecuaciones diferenciales o en diferencias de orden grande.

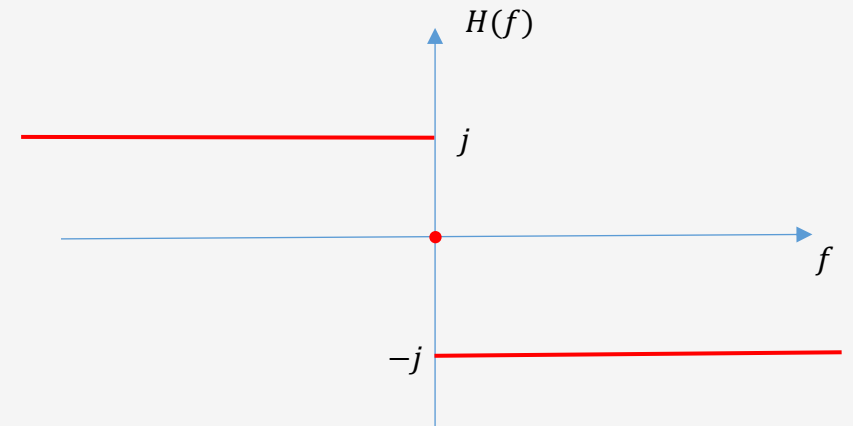
Transformada de Hilbert

$\hat{x}(t) = \mathcal{H}\{x(t)\}$ Transformación lineal: rota la fase de todas las componentes de $x(t)$ en $\pi/2$
 $\langle \hat{x}(t) \rangle = 0$

Vista como sistema real:

$$\left. \begin{aligned} |H(f)| &= \begin{cases} 1 & f \neq 0 \\ 0 & f = 0 \end{cases} \\ \underline{H(f)} &= -\frac{\pi}{2} \operatorname{sgn}(f) \end{aligned} \right\}$$

$$H(f) = -j \operatorname{sgn}(f) \iff h(t) = \frac{1}{\pi t}$$



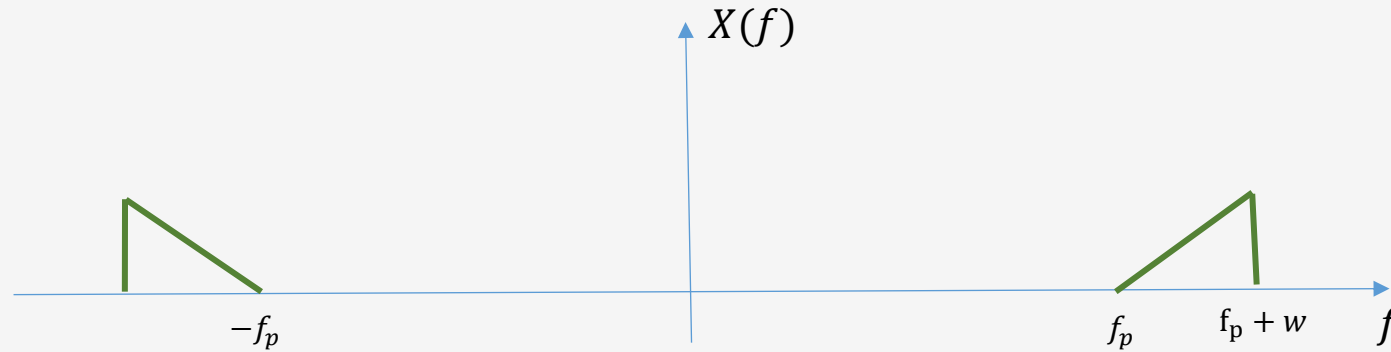
Por ejemplo: $\mathcal{H}\{\cos(2\pi f_p t)\} = \sin(2\pi f_p t)$

- $x(t) = A$ con A constante, entonces $\mathcal{H}\{x(t)\} = 0$
- $\mathcal{H}\{\hat{x}(t)\} = -x(t)$ excepto en continua
- $x(t)$ y $\hat{x}(t)$ son señales ortogonales por lo que $r_{x\hat{x}}(0) = 0$ ($\langle R_{x\hat{x}}(t, t) \rangle = 0$)
- Sean $M(t)$ y $C(t)$ / $S_{MM}(f)S_{CC}(f) = 0$ entonces $\mathcal{H}\{M(t)C(t)\} = M(t)\hat{C}(t)$

Señal Analítica

Modelo determinístico: $m(t) / \mathcal{F}\{m(t)\} = M(f)$ y valor medio nulo

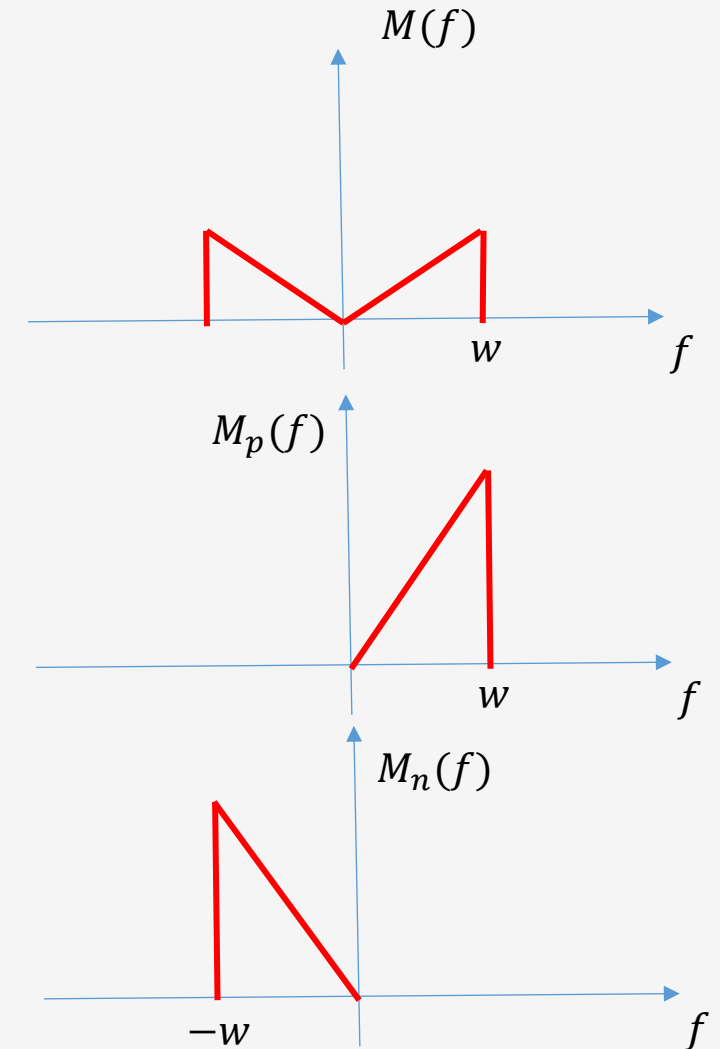
- $m_p(t) = m(t) + j \hat{m}(t)$
- $M_p(f) = 2 M(f) u(f)$
- $m_n(t) = m(t) - j \hat{m}(t)$
- $M_n(f) = 2 M(f) u(-f)$



BLU-S

$$x(t) = \frac{A}{2} [m_p(t)e^{j2\pi f_p t} + m_n(t)e^{-j2\pi f_p t}]$$

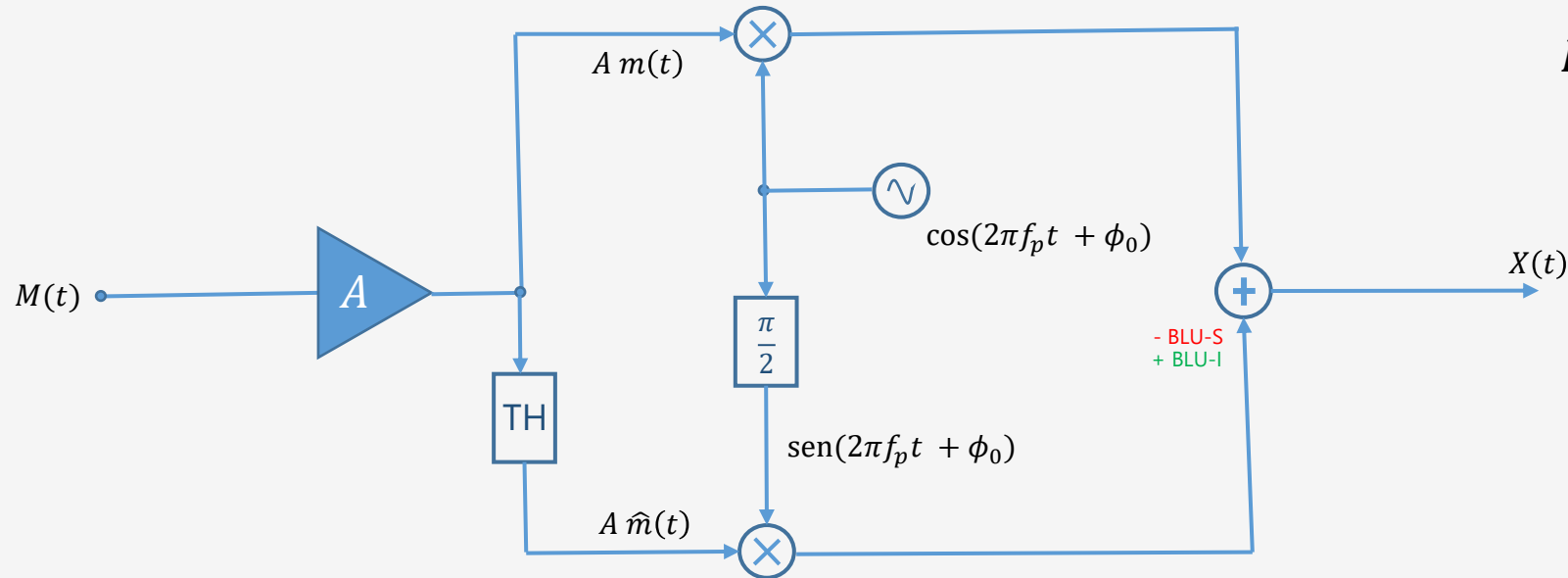
$$x(t) = A m(t) \cos(2\pi f_p t) - A \hat{m}(t) \sin(2\pi f_p t)$$



BLU. Método de fase.

$$x(t) = A m(t) \cos(2\pi f_p t + \phi_0) \mp A \hat{m}(t) \text{sen}(2\pi f_p t + \phi_0)$$

BLU-S
↓
BLU-I
↑



$$P_X = \frac{A^2}{2} P_M + \frac{A^2}{2} P_{\hat{M}} = A^2 P_M$$

$$x(t) = \text{Re}\{A [m(t) + j\hat{m}(t)] e^{j2\pi f_p t + \phi_0}\}$$

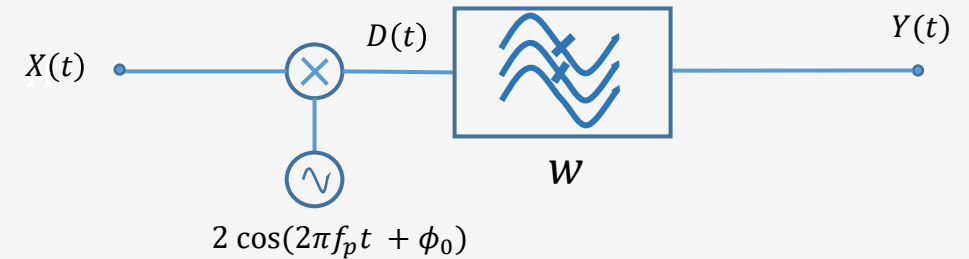
$\hat{m}(t)$ es una versión distorsionada de $m(t)$.

BLU. Demodulación.

$$X(t) = A M(t) \cos(2\pi f_p t + \phi_0) \mp A \hat{M}(t) \sin(2\pi f_p t + \phi_0)$$

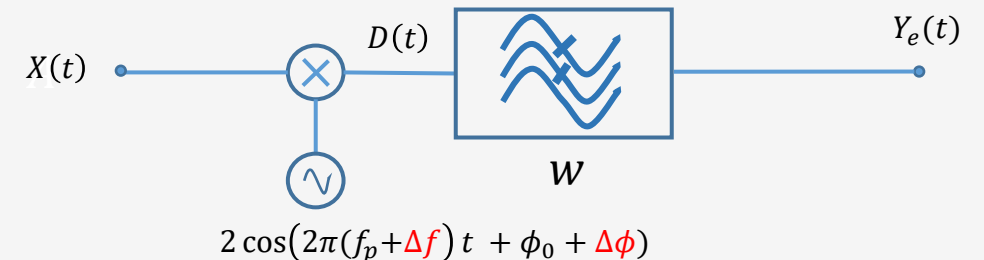
$$Y(t) = \text{LPF}\{X(t) 2 \cos(2\pi f_p t + \phi_0)\}$$

$$Y(t) = A M(t) \quad P_Y = A^2 P_M$$

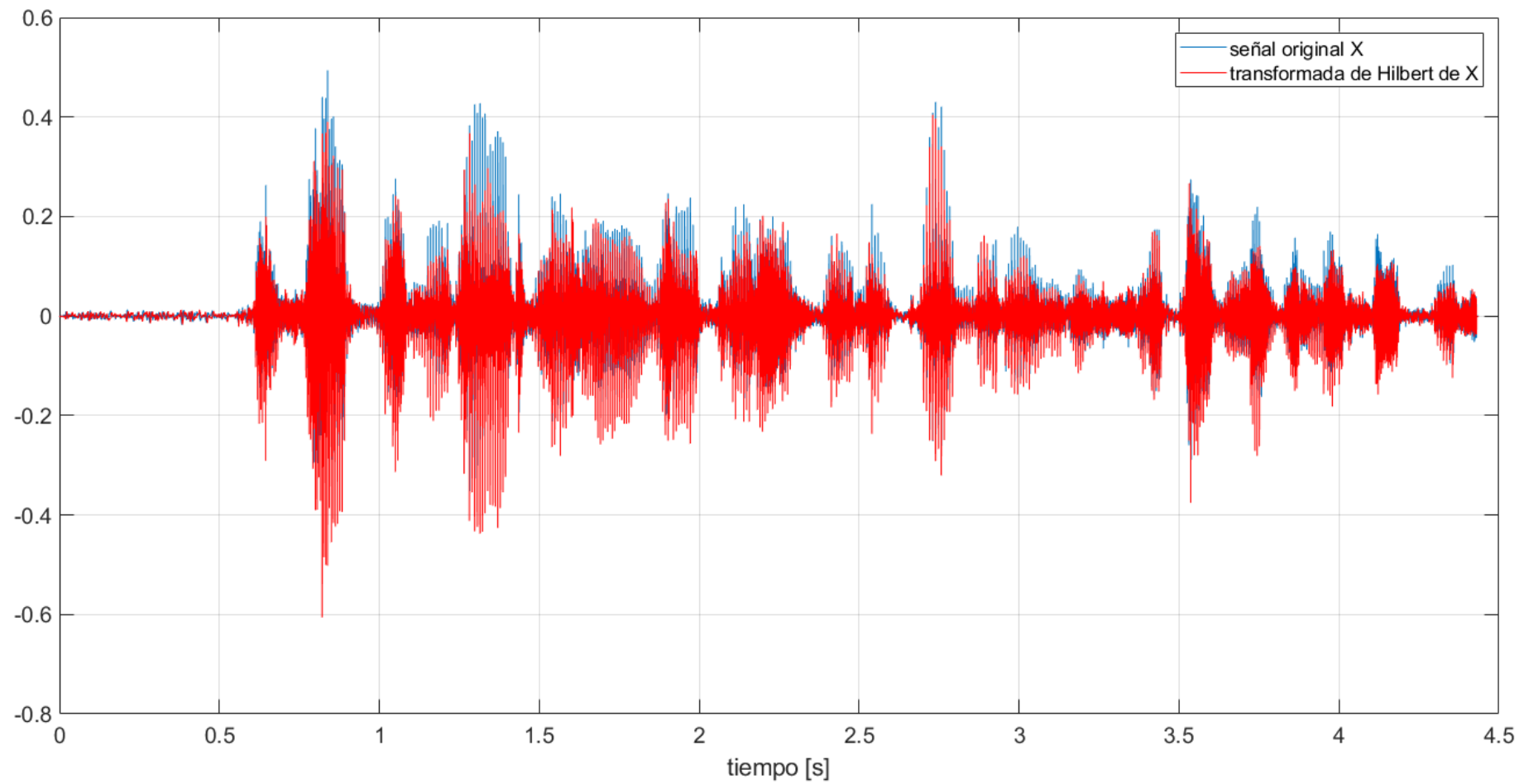


Oscilador local con un error de fase $\Delta\phi$ y de frecuencia Δf

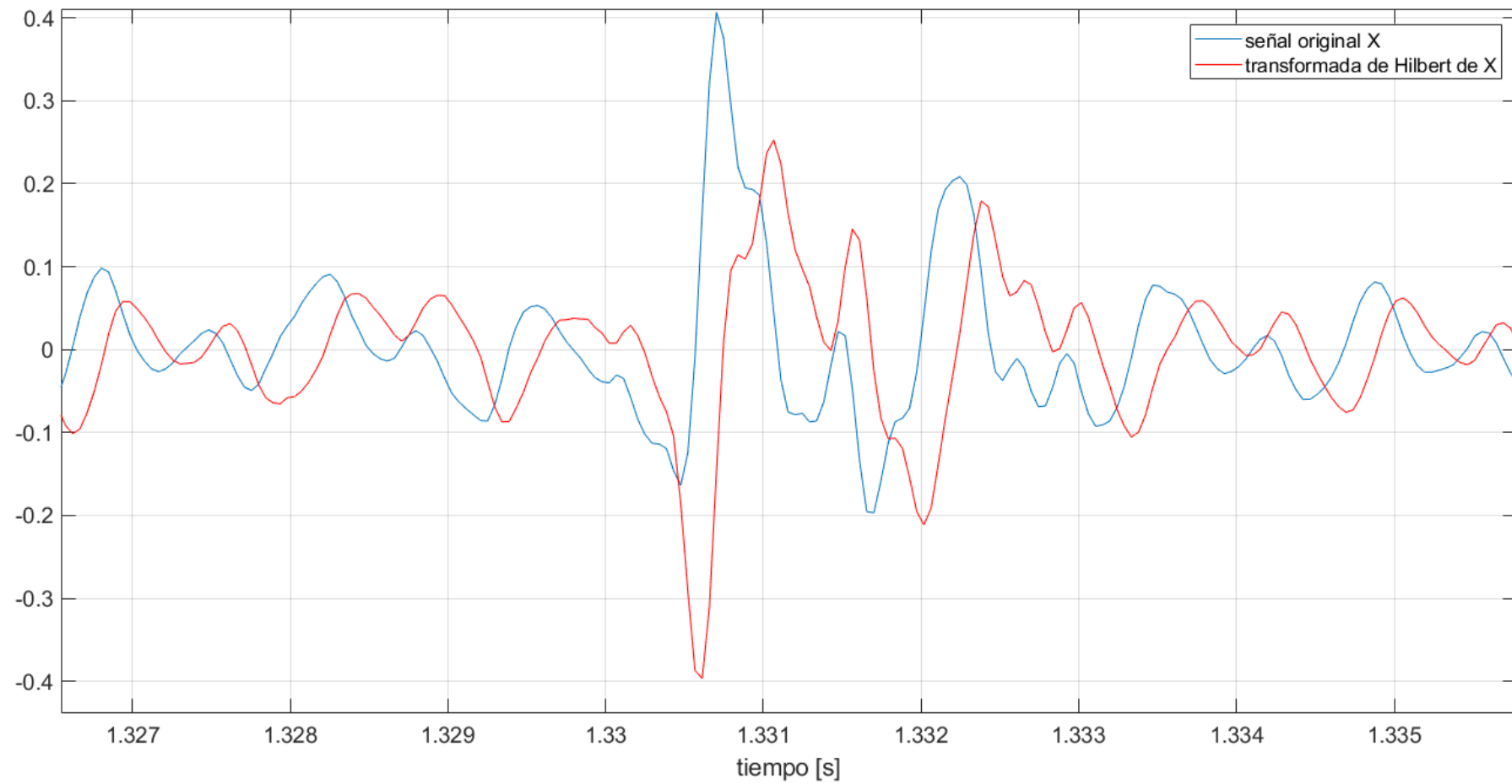
$$Y_e(t) = A M(t) \cos(2\pi \Delta f t + \Delta\phi) \mp A \hat{M}(t) \sin(2\pi \Delta f t + \Delta\phi)$$



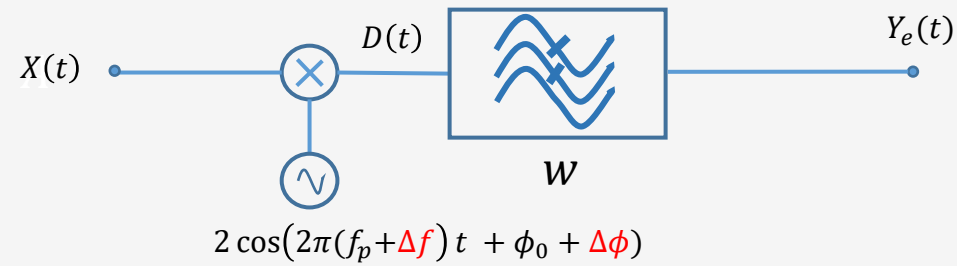
BLU



BLU

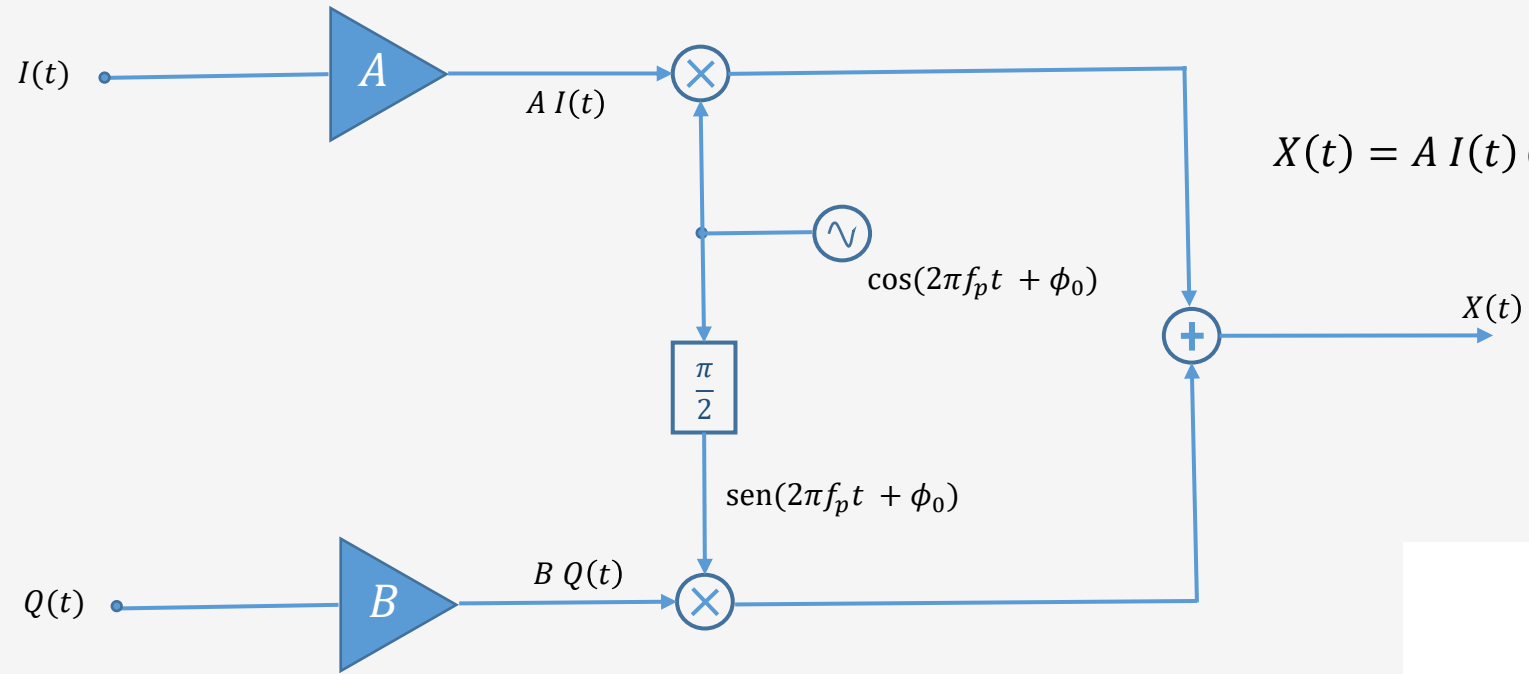


Demodulación de BLU con error de fase y frecuencia en LO.



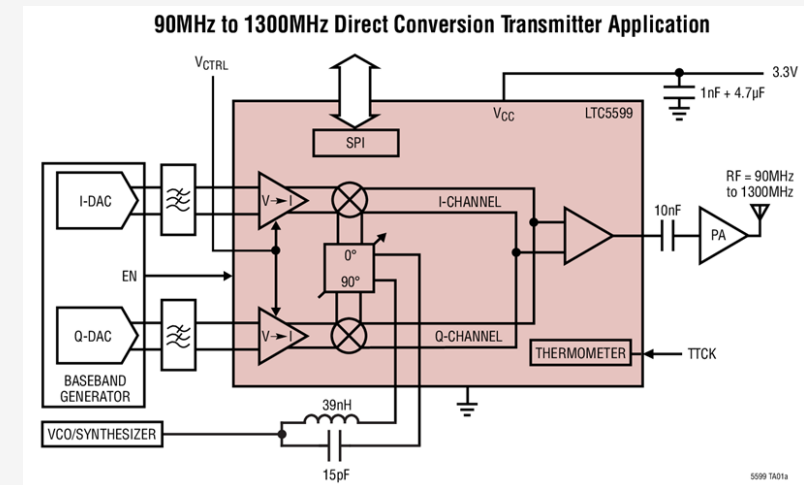
$$Y_e(t) = A M(t) \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\phi) \mp A \hat{M}(t) \sin(2\pi\Delta f t + \Delta\phi)$$

Modulación IQ



$$X(t) = A I(t) \cos(2\pi f_p t + \phi_0) + B Q(t) \sin(2\pi f_p t + \phi_0)$$

LTC5599



Fuentes:

- Principles of Communications, 5/E by Rodger Ziemer and William Tranter, John Wiley & Sons. Inc.
- ITU. Banda Aeronáutica.
- Merlí, Youtube.
- Radio Universidad.
- Analog Devices.

