Módulo 3 **Banda lateral doble**

Cápsula 3.1 Mejoras a AM

¿Qué mejoras se pueden realizar sobre AM para mejorar su eficiencia?

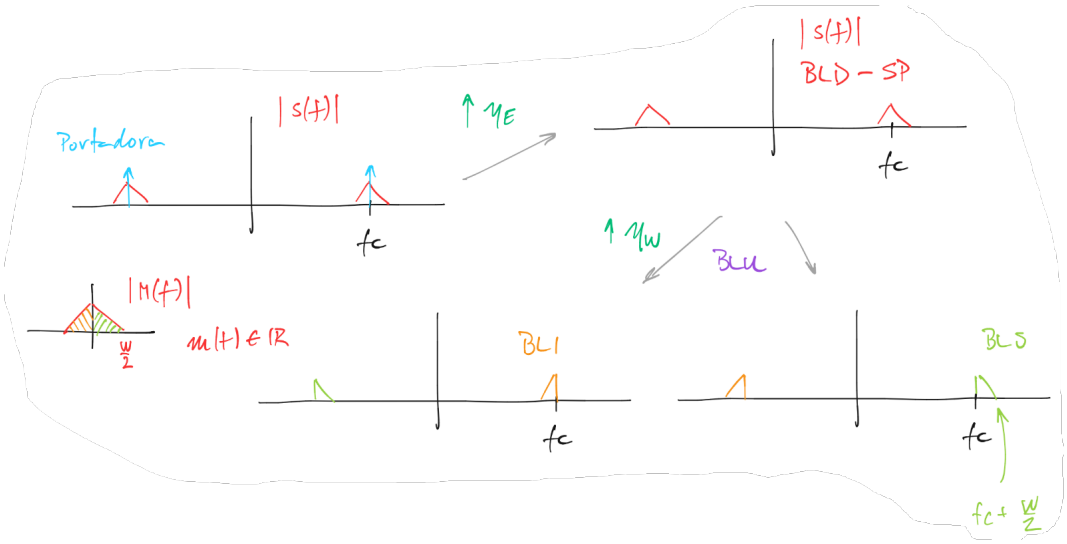


Figura 3.1.1: Espectro de modulaciones AM, BLD-SP, BLI y BLS.

BLD-SP: Banda Lateral Doble con Supresión de Portadora.

BLS: Banda Lateral Superior. } BLU: Banda Lateral Única

BLI: Banda Lateral Inferior. }

- **BLD-SP:** $\eta_{E-BLD} = 100\,\%$ (según la definición de eficiencia energética usada para AM).
- **BLU:** Duplica la EFICIENCIA ESPECTRAL (η_w) (utiliza la mitad del ancho de banda para transmitir el mismo mensaje).

η_E y η_w son conceptos muy importantes en comunicaciones.

Cápsula 3.2 Banda lateral doble con supresión de portadora (BLD-SP)

DSB-SC: *Double Sideband with Supressed Carrier.*

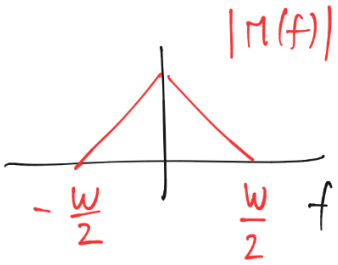


Figura 3.2.1: Magnitud del espectro de la señal modulante.

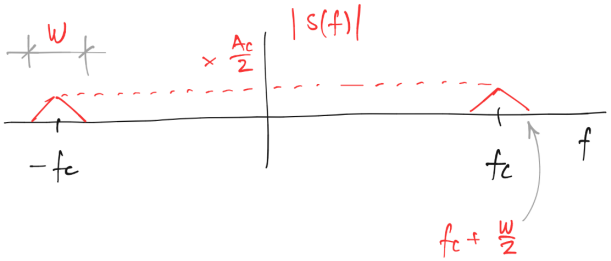


Figura 3.2.2: Magnitud del espectro de la señal modulada.

Modulador:

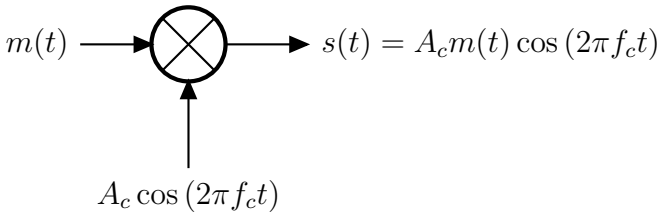


Figura 3.2.3: Modulador BLD–SP.

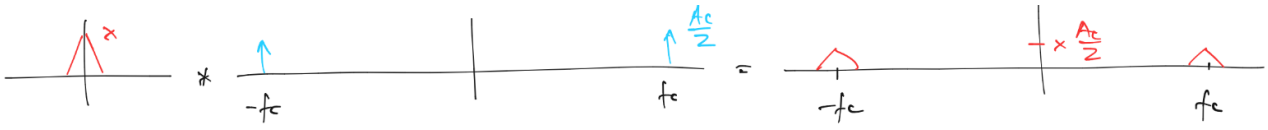


Figura 3.2.4: Espectro de señal modulada $s(t)$.

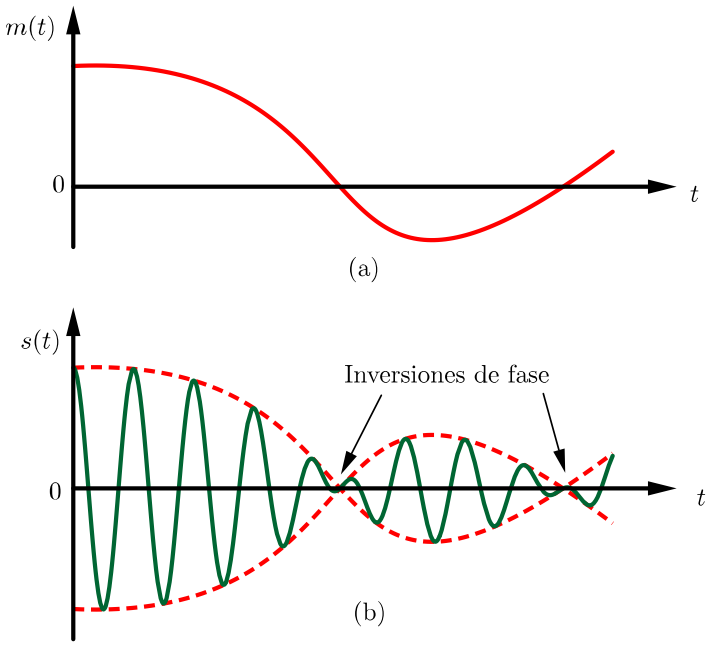


Figura 3.2.5: Modulación de banda lateral doble con supresión de portadora: (a) señal modulante, (b) señal modulada.

BLD-SP: se trata de la TRASLACIÓN ESPECTRAL en el sentido "clásico" de análisis de señales.

Demodulación BLD-SP:

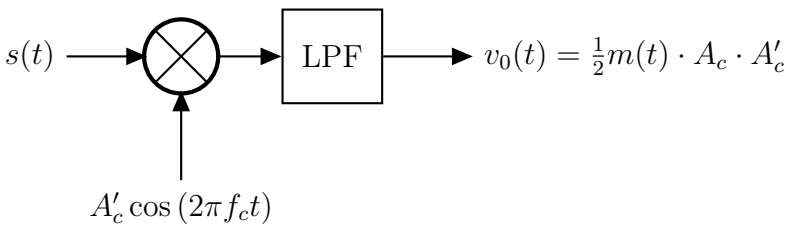


Figura 3.2.6: Detector coherente para BLD-SP

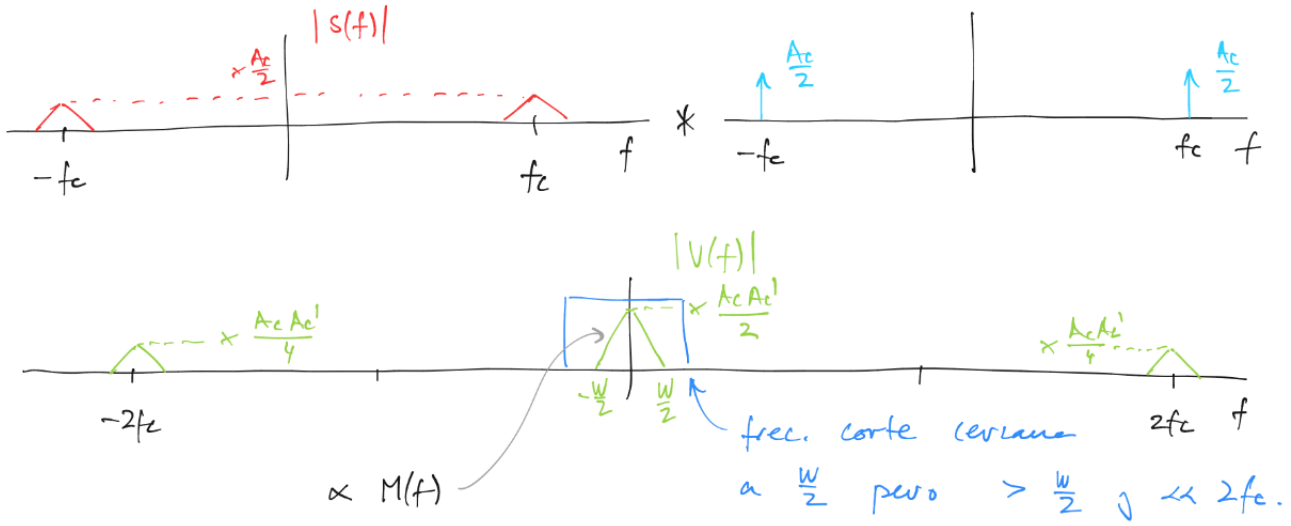


Figura 3.2.7: Espectro de señal demodulada $v_0(t)$.

Cápsula 3.3 — Coherencia entre portadoras del Tx y Rx

Ej. Se tiene una Tx BLD-SP con $f_c = 100$ MHz.

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \cdot 10^8 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{100 \cdot 10^6 \ \text{Hz}} = 3 \ \text{m} \implies \frac{\lambda}{4} = 75 \ \text{m} \tag{3.3.1}$$

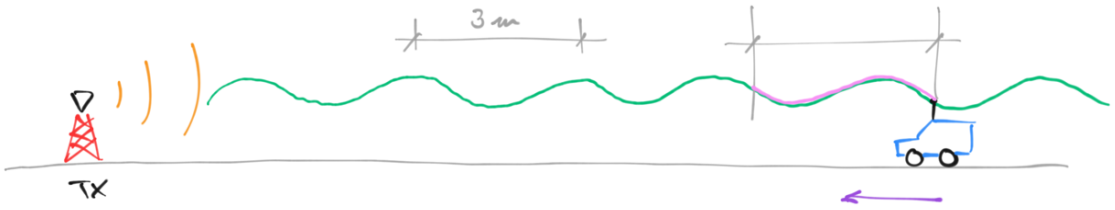


Figura 3.3.1: Ejemplo TX BLD-SP con $f_c = 100$ MHz.

¿En cuánto tiempo recorre el móvil una longitud de onda de portadora? Considere que este tiene una velocidad de 100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

$$v = 100 \ \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \ \frac{\text{m}}{\text{km}}}{3600 \ \frac{\text{s}}{\text{h}}} \quad \left(= 27{,}7 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \tag{3.3.2}$$

$$t_0 = \frac{d}{v} = \frac{\lambda}{v} = \frac{3 \text{ m}}{100 \cdot \frac{1000}{3600} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{3 \cdot 36}{1000} = 108 \text{ ms} \tag{3.3.3}$$

¿Cuántos ciclos de portadora recorre el vehículo en 1 s?

$$v \cdot t = d \implies v \cdot 1 = d_1 \tag{3.3.4}$$

Nos interesa:

$$\frac{d_1}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{t_0} = \frac{1}{108 \text{ ms}} \approx 10 \text{ ciclos} \tag{3.3.5}$$

$\implies$ Para el móvil, la portadora en 1 s no tiene 100 MHz (millones de ciclos), sino que el móvil observa una portadora que en 1 s oscila $100 \cdot 10^6 + 10$ veces.

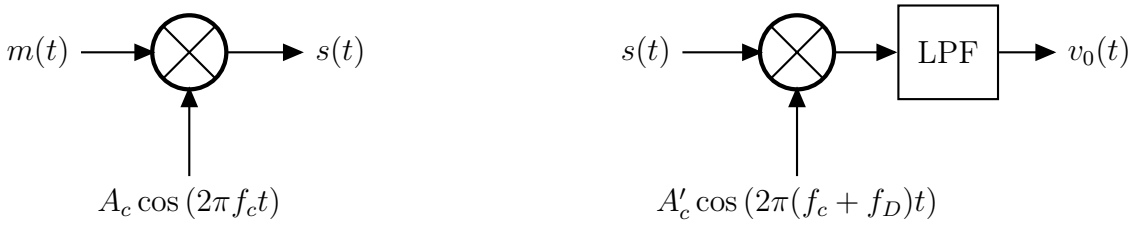
$\implies$ Móvil observa una portadora de frecuencia:

$$f_c' = f_c + f_d \quad , \quad \text{con } f_D = \frac{v}{\lambda} \tag{3.3.6}$$

$$= 100 \text{ MHz} + \frac{1}{t_0} \text{ Hz} \tag{3.3.7}$$

Concluimos que no es razonable asumir portadoras coherentes entre Tx y Rx.

Cápsula 3.4 Demodulación de BLD-SP con portadoras no coherentes



(a) Modulador BLD–SP. **(b)** Demodulador BLD–SP.

Figura 3.4.1: Modulación y demodulación BLD-SP.

Expandiendo el término de la derecha

$$\cos(2\pi(f_c + f_D)t) = \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_D t) \tag{3.4.1}$$

$$= \cos(2\pi f_c + \varphi(t)) \tag{3.4.2}$$

$\varphi(t)$ varía mucho más lento que $2\pi f_c t$.

Modelemos la demodulación de BLD-SP cuando la portadora del Rx es $A'_c \cos(2\pi f_c t) + \varphi(t)$.

$$v(t) = A'_c \cos\big(2\pi f_c t + \varphi(t)\big) \cdot A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \tag{3.4.3}$$

$$= \frac{1}{2} A_c A'_c \cos\big(\cancel{4\pi f_c t + \varphi(t)}\big) m(t) + \frac{1}{2} A_c A'_c \cos\big(\varphi(t)\big) m(t) \tag{3.4.4}$$

eliminado por LPF

$$\implies \quad v_o(t) = \tfrac{1}{2} A_c A'_c \underbrace{\cos\big(\phi(t)\big)}_{\cos(\phi(t)) = 0 \text{ genera un cero en cuadratura}} m(t) \tag{3.4.5}$$

$\varphi(t)$ varía lentamente de 0 a $\frac{\pi}{2}$ en el tiempo que el móvil recorre $\frac{\lambda}{4}$. Los ceros de cuadratura se alternan con "buena" señal cada $\frac{108}{4} \approx 27{,}7$ ms.

En Hz: $\frac{1}{27{,}7 \text{ ms}} \approx 37$ Hz $\quad (= 4 \cdot f_D)$

El móvil ve fluctuar $v_0(t)$ aprox. 37 veces por segundo entre "buena señal" y "nada".

Este problema no se presenta en la recepción AM con detector de envolvente.

Moraleja: Al tratar de resolver un problema de eficiencia energética, surge un nuevo problema que afecta la COMPLEJIDAD DE IMPLEMENTACIÓN (costo) del receptor.

Cápsula 3.5 **Loop de Costas: señal de control**

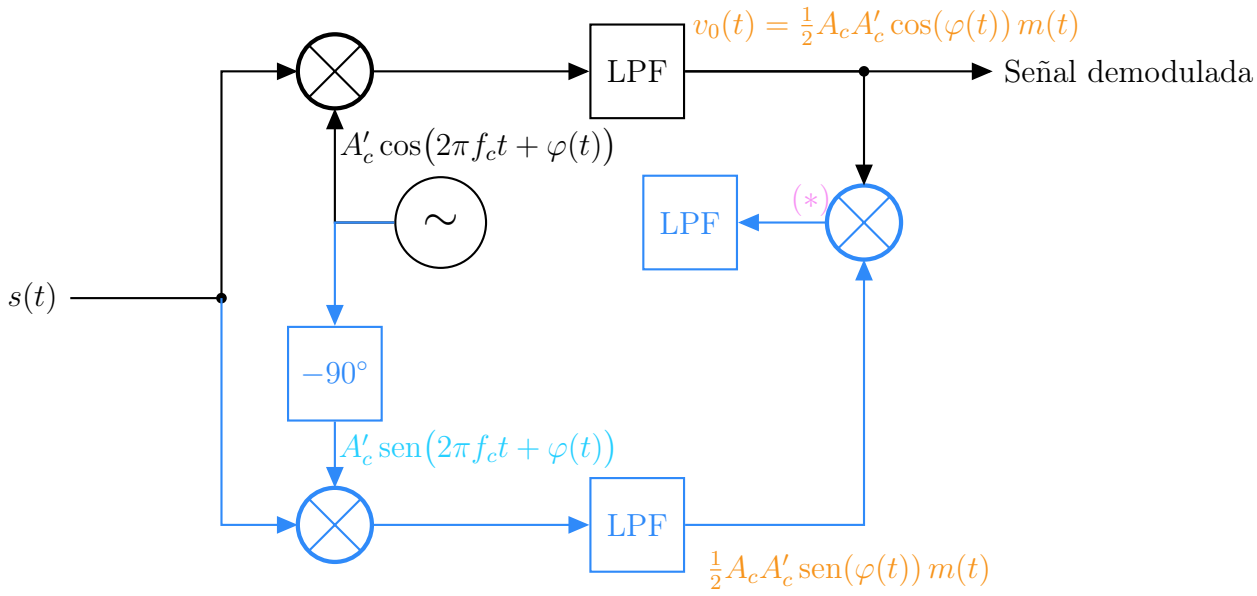


Figura 3.5.1: Diagrama de bloques del Loop de Costas.

$$(*) = \frac{1}{4} A_c^2 A_c'^2 \cos(\varphi(t)) \operatorname{sen}(\varphi(t))\, m^2(t) \tag{3.5.1}$$

$$= \frac{1}{4} A_c^2 A_c'^2 \cdot \frac{1}{2} \operatorname{sen}(2\varphi(t))\, m^2(t) \tag{3.5.2}$$

para $\varphi(t)$ pequeño

$$= \frac{1}{4} A_c^2 A_c'^2 \varphi(t) m^2(t) \tag{3.5.3}$$

¿Cuál es el ancho de banda de $\varphi(t)m^2(t)$?

$$\varphi(t)m^2(t) \leftrightarrow \phi(f) * M(f) * M(f) \tag{3.5.4}$$

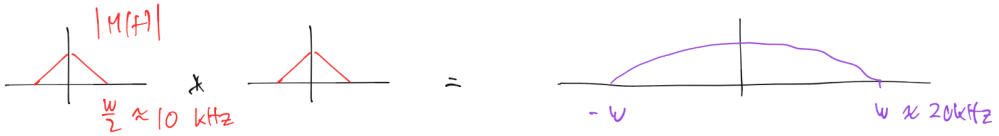


Figura 3.5.2: Espectro de $m^2(t)$

El ancho de banda de $m^2(t)$ es W. Ya habíamos visto que $\varphi(t)$ varía con frecuencia en el orden de pocos (decenas) de Hz.

$\Longrightarrow$ Ej: 10 Hz.

$\Longrightarrow$ El contenido espectral está $\in [-10\text{ Hz}, 10\text{ Hz}]$.

$\Longrightarrow$ $\varphi(t)$ cambia muy lentamente con respecto a $m^2(t)$.

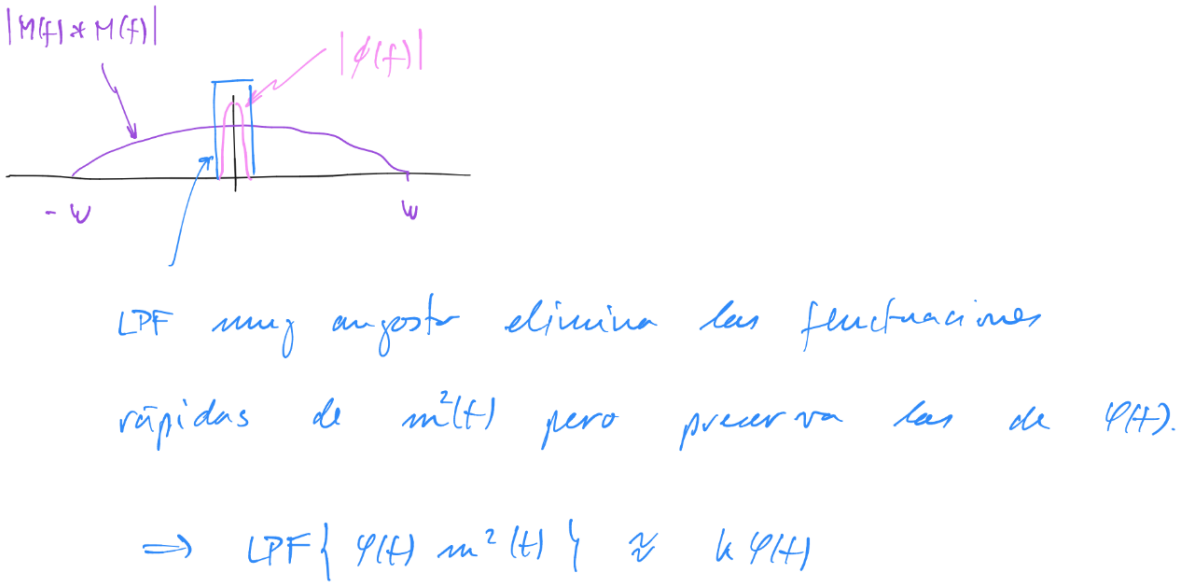


Figura 3.5.3: Respuesta en frecuencia de LPF$\{\varphi(t)m^2(t)\}$.

Cápsula 3.6	**Loop de Costas: oscilador controlado por voltaje**

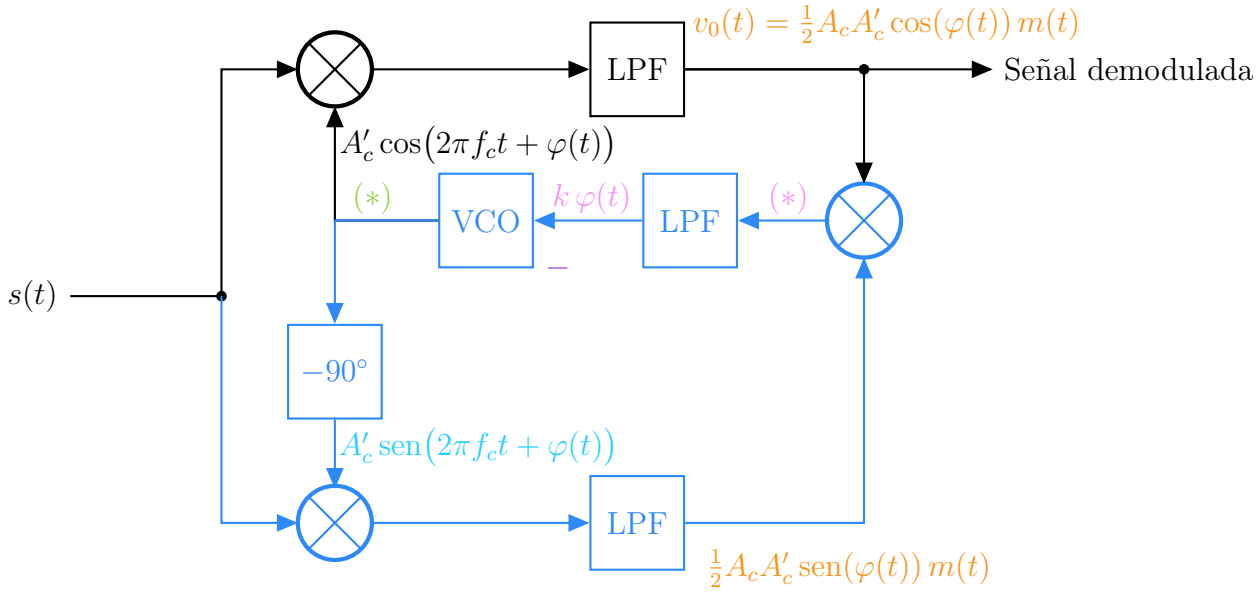


Figura 3.6.1: Diagrama de bloques del Loop de Costas.

VCO: *Voltage Controlled Osillator*

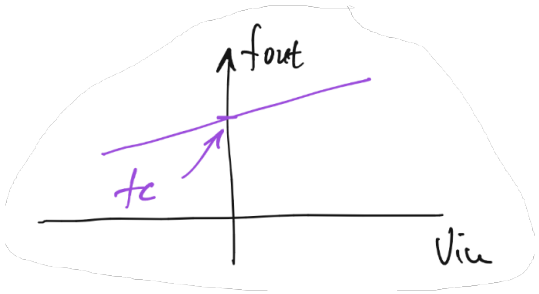


Figura 3.6.2: Relación entrada–salida de un oscilador controlador por voltaje (VCO).

$$
\begin{aligned}
(*) &= A_c' \cos\left(2\pi\, f_{\text{out}}\, t + \varphi_0\right) && (3.6.1)\\
&= A_c' \cos\left(2\pi\, (f_c + f_\Delta)\, t + \varphi_0\right) && (3.6.2)\\
&= A_c' \cos(2\pi f_c t + \underbrace{2\pi f_\Delta t + \varphi_0}_{\varphi(t)}) && (3.6.3)\\
&= A_c' \cos\left(2\pi f_c t + \varphi(t)\right) && (3.6.4)
\end{aligned}
$$

© 2010–2025 Christian Oberli