

Moduladores y Transmisores de Señales moduladas en Angulo

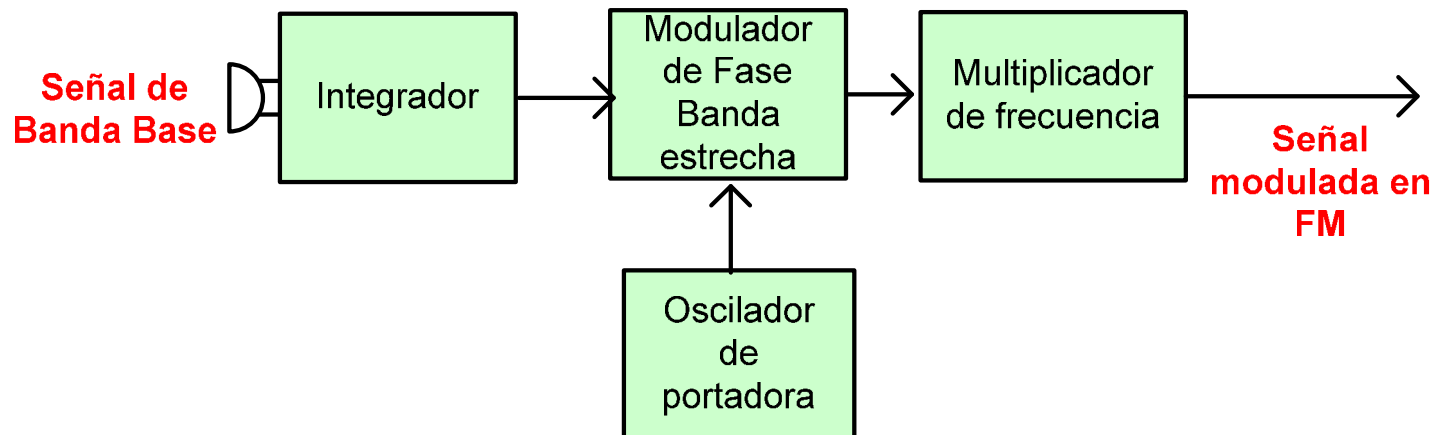
Existen dos métodos para generar señales FM:

Método indirecto: utiliza modulación FM de banda estrecha y multiplicación en frecuencia para incrementar el nivel de desviación en frecuencia hasta el valor deseado

Método directo: se varia directamente la frecuencia de la portadora de acuerdo con la señal moduladora.

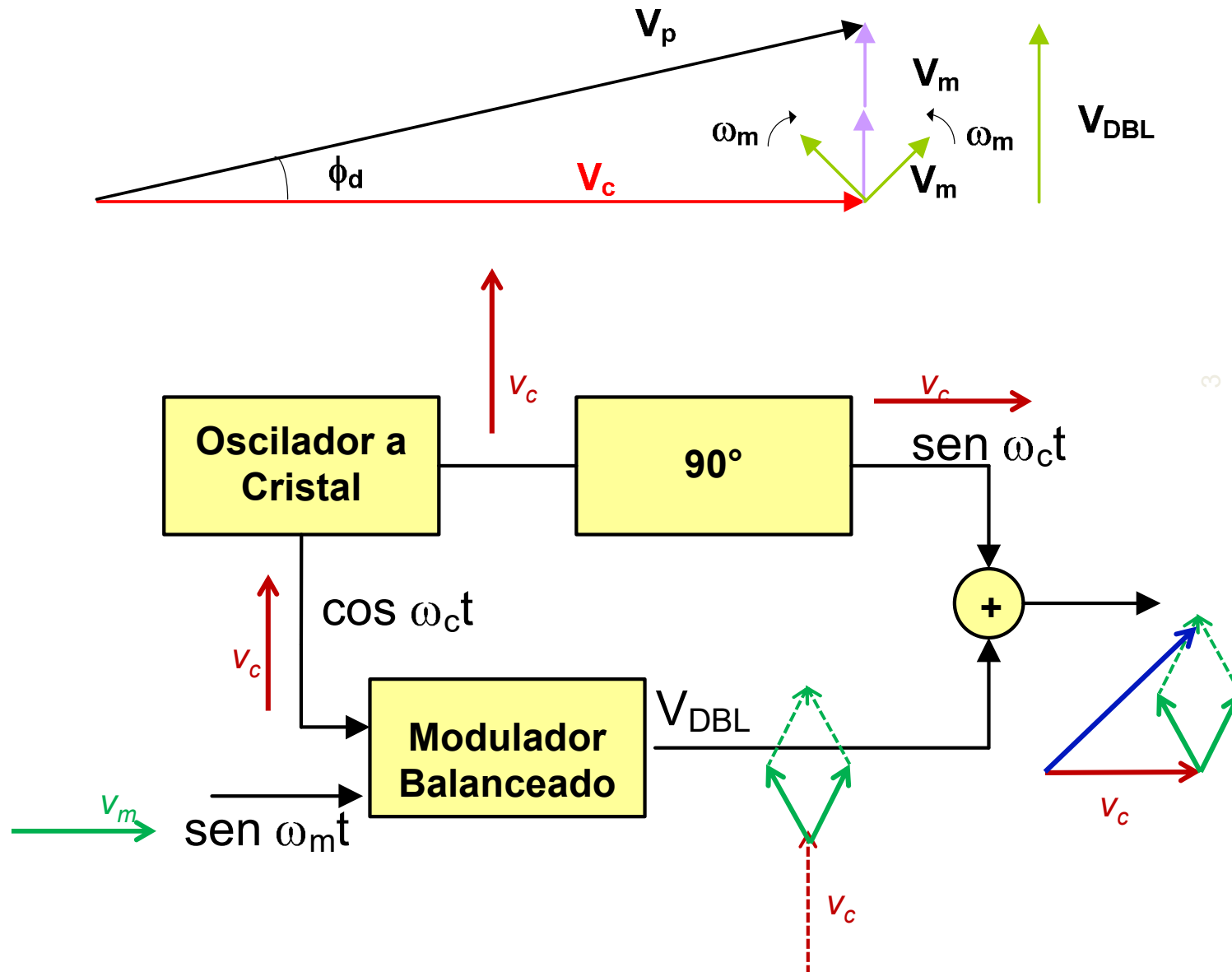
Método indirecto

Usa el modulador Armstrog, que es un modulador de fase con bajo índice de modulación ($m_p < 0,5$), o sea de banda estrecha, ya que tiene un solo par de bandas laterales.



MODULADOR ARMSTRONG

3



Fundamento matemático:

Una señal modulada en ángulo puede ser representada mediante la serie de Bessel

$$\begin{aligned} v = V_C \{ & J_0(m) \text{sen } \omega_c t + J_1(m) [\text{sen}(\omega_c + \omega_m)t - \text{sen}(\omega_c - \omega_m)t] + \\ & + J_2(m) [\text{sen}(\omega_c + 2\omega_m)t + \text{sen}(\omega_c - 2\omega_m)t] + \\ & + J_3(m) [\text{sen}(\omega_c + 3\omega_m)t - \text{sen}(\omega_c - 3\omega_m)t] + \\ & + J_4(m) [\text{sen}(\omega_c + 4\omega_m)t + \text{sen}(\omega_c - 4\omega_m)t] + \dots \} \end{aligned}$$

Para un índice de modulación $m < 0,5$, solo se necesita tomar la portadora y un par de bandas laterales sin cometer un error significativo.

Si $m=0,5$

$$J_0 = 0,938$$

$$J_1 = 0,242$$

$$J_2 = 0,031$$

$$J_0^2 = 0,881$$

$$J_1^2 = 2 \times 0,059 = 0,118$$

$$J_2^2 = 2 \times 0,000937 = 0,001874$$

Si se ignora la segunda banda lateral y se calcula el error, se comprueba que el error es mínimo: $\epsilon < 1\%$

Una vez eliminadas las componentes de segundo orden y las mayores queda:

$$v = V_C \{J_0(m) \sin \omega_c t + J_1(m) [\sin(\omega_c + \omega_m)t - \sin(\omega_c - \omega_m)t]\}$$

Veamos que ocurre en el diagrama de bloques:

El modulador balanceado es excitado por:

$$v_C(t) = V_C \cos \omega_c t$$

$$v_m(t) = V_m \sin \omega_m t$$

A la salida del modulador balanceado se tiene una señal de doble banda lateral portadora suprimida:

$$v_{DBL}(t) = V_C \frac{V_m}{2} [\sin(\omega_c + \omega_m)t - \sin(\omega_c - \omega_m)t]$$

La señal de portadora desfasada es:

$$v_{C90^\circ}(t) = V_C \sin \omega_c t$$

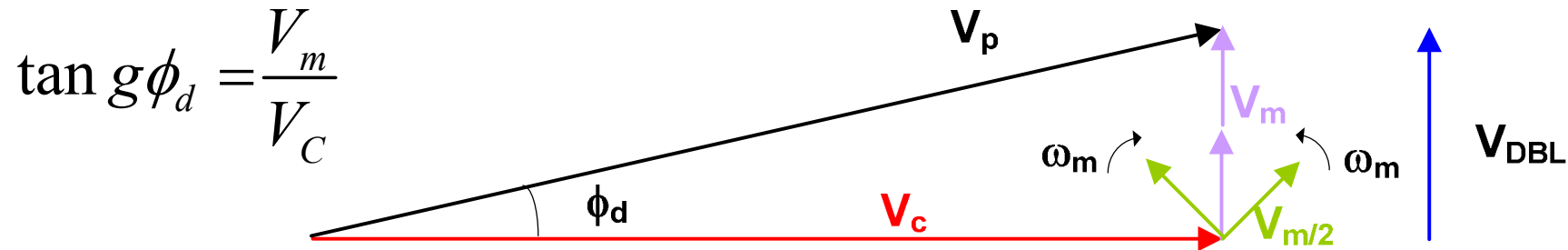
MODULADOR ARMSTRONG

6

Sumando la portadora desfasada 90° a la señal de DBL, se obtiene:

$$v_{PM}(t) = V_C \sin \omega_c t + V_C \frac{m_a}{2} [\sin(\omega_c + \omega_m)t - \sin(\omega_c - \omega_m)t]$$

Esta es una señal modulada en fase de banda angosta, ya que tiene solo un par de bandas laterales.



La figura muestra la suma de los fasores portadora desfasada 90° y la señal de DBL.

Las bandas laterales superior e inferior se combinan para producir un componente (V_m) que está siempre en cuadratura. Puede observarse que la salida de la red combinada es una señal cuya fase varía en una proporción igual a f_m y su magnitud es directamente proporcional a la magnitud de V_m .

Se puede observar que la desviación de fase pico (índice de modulación) es:

$$\tan \phi_d = \frac{V_m}{V_C}$$

Donde para valores de $\phi_d < 10^\circ$ se cumple que el ángulo es aproximadamente igual a la tangente que es 0,17763 y tiene un error menor al 1%.

$$\phi_d = \frac{V_m}{V_C} = m_p$$

Observar: $\phi_d \propto V_m \Rightarrow PM$

Se puede observar que la variación de fase es directamente proporcional a $V_m \Rightarrow PM \Rightarrow$ **hace falta un integrador** para que sea un Modulador de FM

La máxima desviación de frecuencia que se puede obtener es:

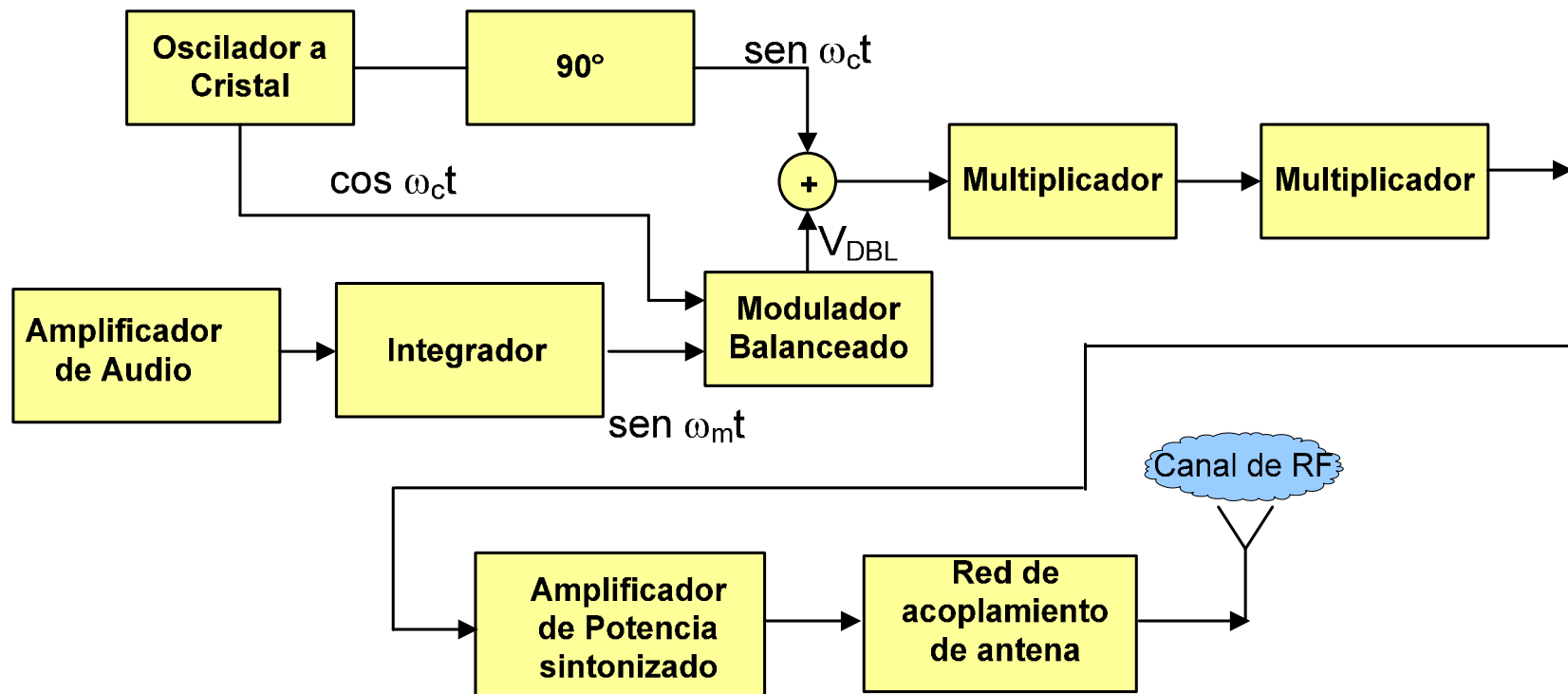
$$m_{f \text{ máx}} = \frac{\Delta_{f \text{ máx}}}{f_{m \text{ mín}}} \Rightarrow \Delta_{f \text{ máx}} = m_{f \text{ máx}} \cdot f_{m \text{ mín}}$$

Como se observa, la desviación de frecuencia obtenida es pequeña, hacen falta multiplicadores para obtener la desviación de frecuencia necesaria en antena

MODULADOR ARMSTRONG

8

El diagrama de bloques total de un Transmisor de FM Homodino que usa modulador Armstrong es:



Ventajas de la señal de FM obtenida por este método:

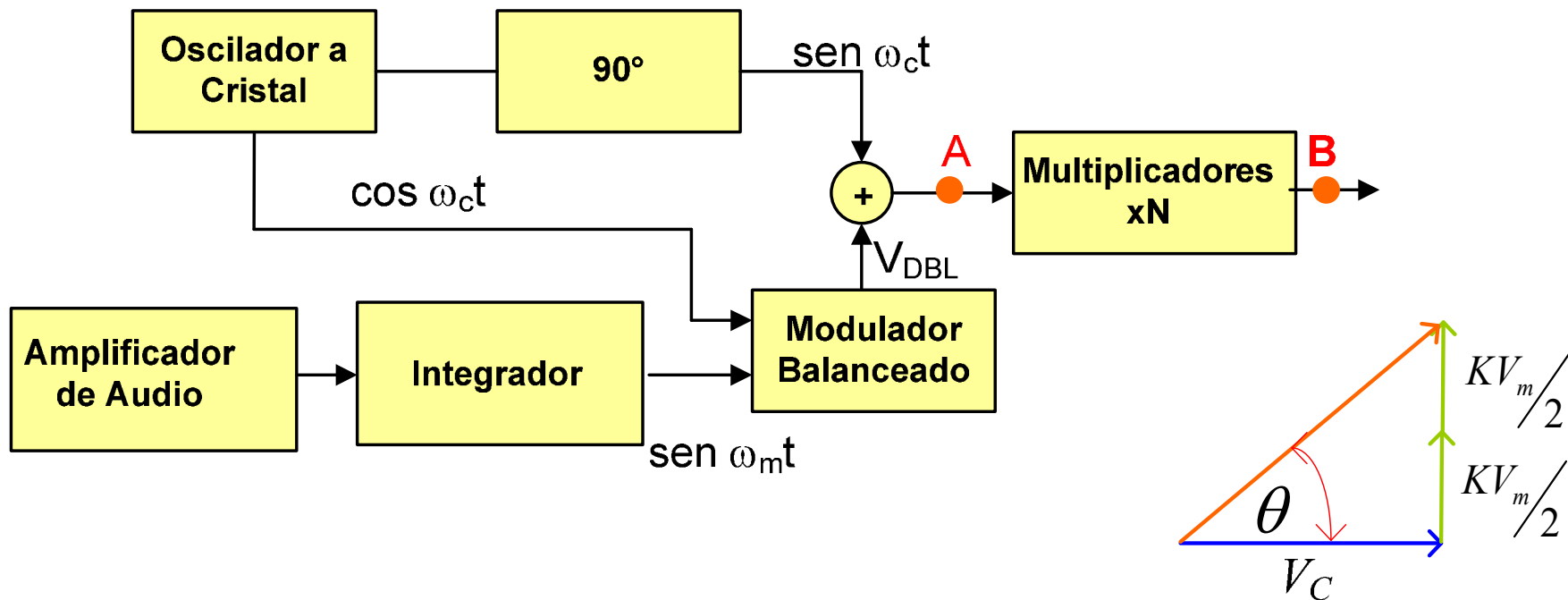
- Es un método que permite obtener señales muy lineales para usar en alta fidelidad.
- Cuenta con una muy buena estabilidad en frecuencia gracias a la generación a partir de un oscilador controlado por un cristal.

Desventajas de la señal de FM obtenida por este método:

- Tiene un Δf muy pequeño, lo que obliga a utilizar etapas multiplicadoras para lograr el valor normalizado.
- La señal de salida contiene modulación de AM en pequeños porcentajes que pueden ser eliminados en los amplificadores clase "C" saturados que se utilizan como multiplicadores.

EJEMPLO

Diseñar un transmisor de FM que utiliza un modulador tipo Armstrong, que debe ser modulado con un error de linealidad, menor al 2,9 %, a una frecuencia $f_o = 1,3 \text{ MHz}$. La señal a transmitir tiene una portadora $f_c = 148 \text{ MHz}$, $\Delta f_{\text{máx}} = 5 \text{ KHz}$, $f_{\text{mín}} = 300 \text{ Hz}$ y $f_{\text{máx}} = 3300 \text{ Hz}$.

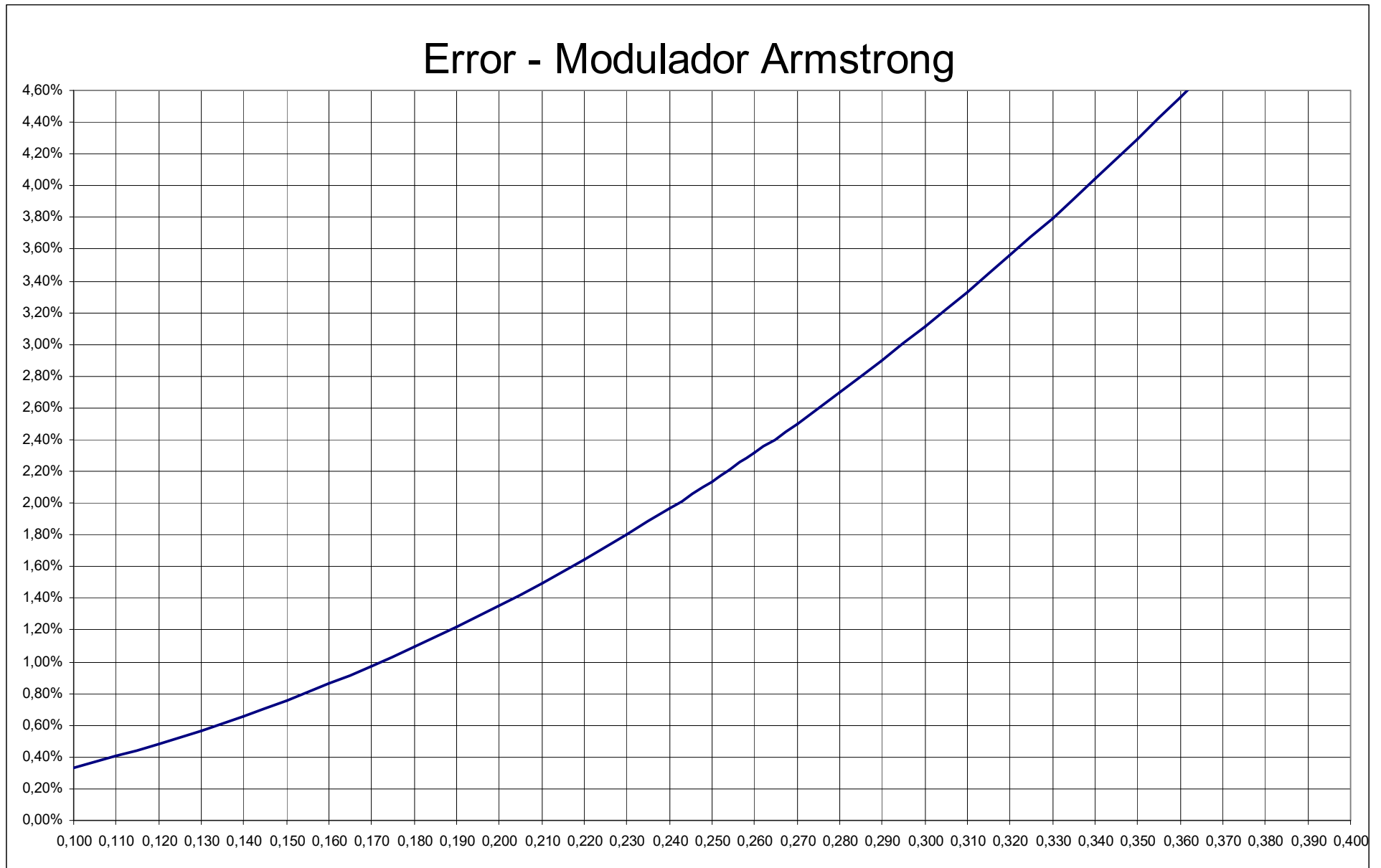


El error cometido por el modulador Armstrong es: $\xi = (\text{tg } \theta - \theta)/\theta$

$$\xi = (\text{tg } \theta - \theta)/\theta$$

Si se grafica la función error, se obtiene:

11



Del gráfico, para un error menor al 2,9% se obtiene:

$$\Delta\theta_{\text{máx}} \leq 0,29\text{rad}$$

Se adopta 0,28rad, por seguridad

a) Calcule el $\Delta f_{\text{máx}}$ a la salida del modulador

$$\Delta\theta_{\text{máx}A} = \frac{\Delta f_{\text{máx}A}}{f_{m_{\text{mín}}}} \Rightarrow \Delta f_{\text{máx}A} = \Delta\theta_{\text{máx}A} \times f_{m_{\text{mín}}} = 0,28 \times 300\text{Hz} = 84\text{Hz}$$

b) Calcule el factor de multiplicación mínimo del transmisor

$$N = \frac{\Delta f_{\text{máx} \text{ Antena}}}{\Delta f_{\text{máx}A}} = \frac{5000\text{Hz}}{84\text{Hz}} = 59,52$$

Como es imposible construir un multiplicador por 59,52, se trata de llegar al valor más cercano posible (y luego se compensará variando V_m)

$$N' = 3^3 \times 2 = 54 \Rightarrow \Delta f_{mA} = 5000\text{Hz}/54 = 92.6\text{ Hz} \Rightarrow \theta_{\text{máx}A} = \Delta f_{mA}/300 = 0.30\text{rad}.$$

Con este valor de $\theta_{\text{máx}A}$ se obtiene un error del 3,1%. Si se desea bajar el error, se debe recalcular N'

c) Proponga un conjunto de dobladores y triplicadores que resulten adecuados para que el transmisor cumpla con las especificaciones de salida

$$N'=2^6 = 64 \Rightarrow \Delta f_{mA} = 5000\text{Hz}/64 = 78,125 \text{ Hz} \Rightarrow \theta_{mA} = \Delta f_{mA}/300 = 0.26 \text{ rad.}$$

Con este valor de θ_{mA} se obtiene un error del 2,3%

d) Dibuje el diagrama completo del transmisor.

A la salida del modulador la frecuencia central es:

$f_{oA} = f_o = 1,3\text{MHz}$, la que se verá afectada por los multiplicadores.

Por lo tanto a la salida de los multiplicadores:

$$f_{oB} = N \times f_{oA}$$



$$f_{oB} = 64 \times 1,3\text{MHz} = 83,2\text{MHz}$$

La frecuencia solicitada en antena es de 148 MHz, se debe poner un mezclador, con su oscilador local, para obtener la frecuencia central solicitada.

Los valores posible de oscilador local son:

$$f_{OL1} = f_{oC} - f_{oB}$$

$$f_{OL1} = 148\text{MHz} - 83,2 \text{ MHz}$$

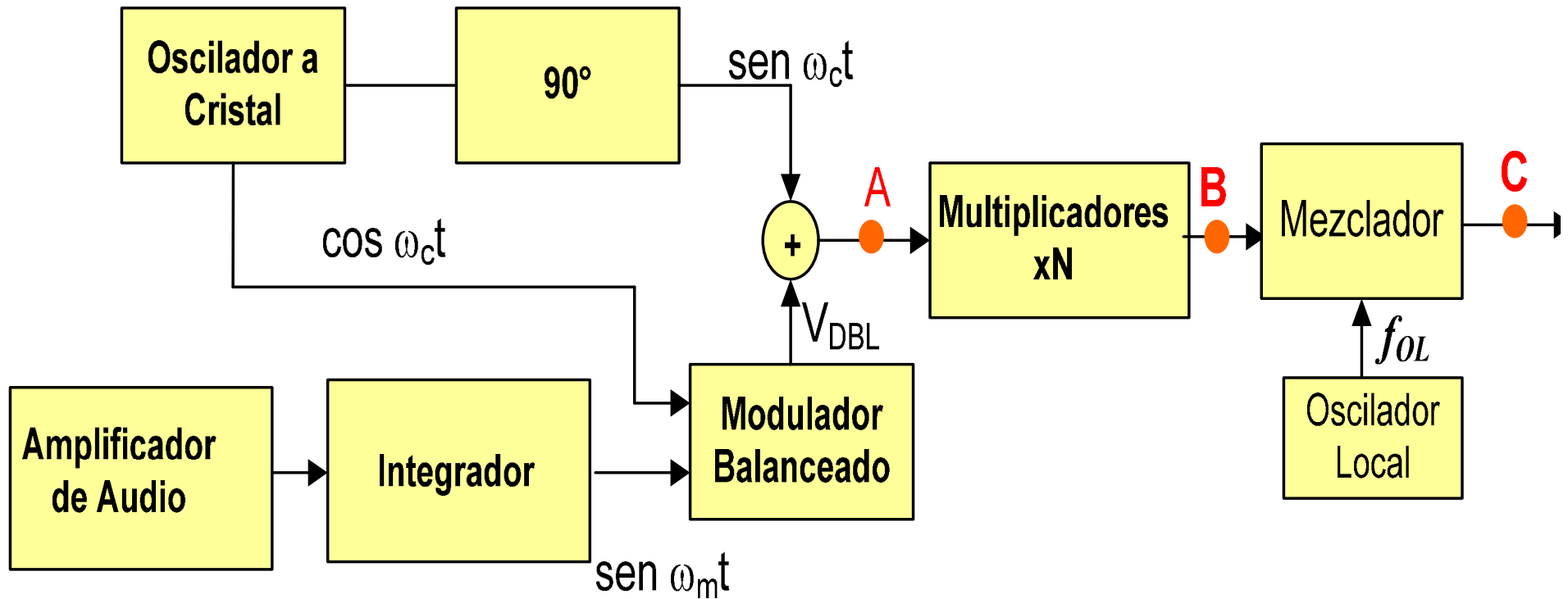
$$f_{OL1} = 64,8 \text{ MHz}$$

$$f_{OL2} = f_{oC} + f_{oB}$$

$$f_{OL1} = 148\text{MHz} + 83,2 \text{ MHz}$$

$$f_{OL1} = 231,2 \text{ MHz}$$

El diagrama del transmisor queda:



Un modulador directo, genera una señal modulada en frecuencia que cuya desviación de frecuencia es proporcional a la tensión de la señal moduladora, es decir:

$$\Delta f = K_f V_m$$

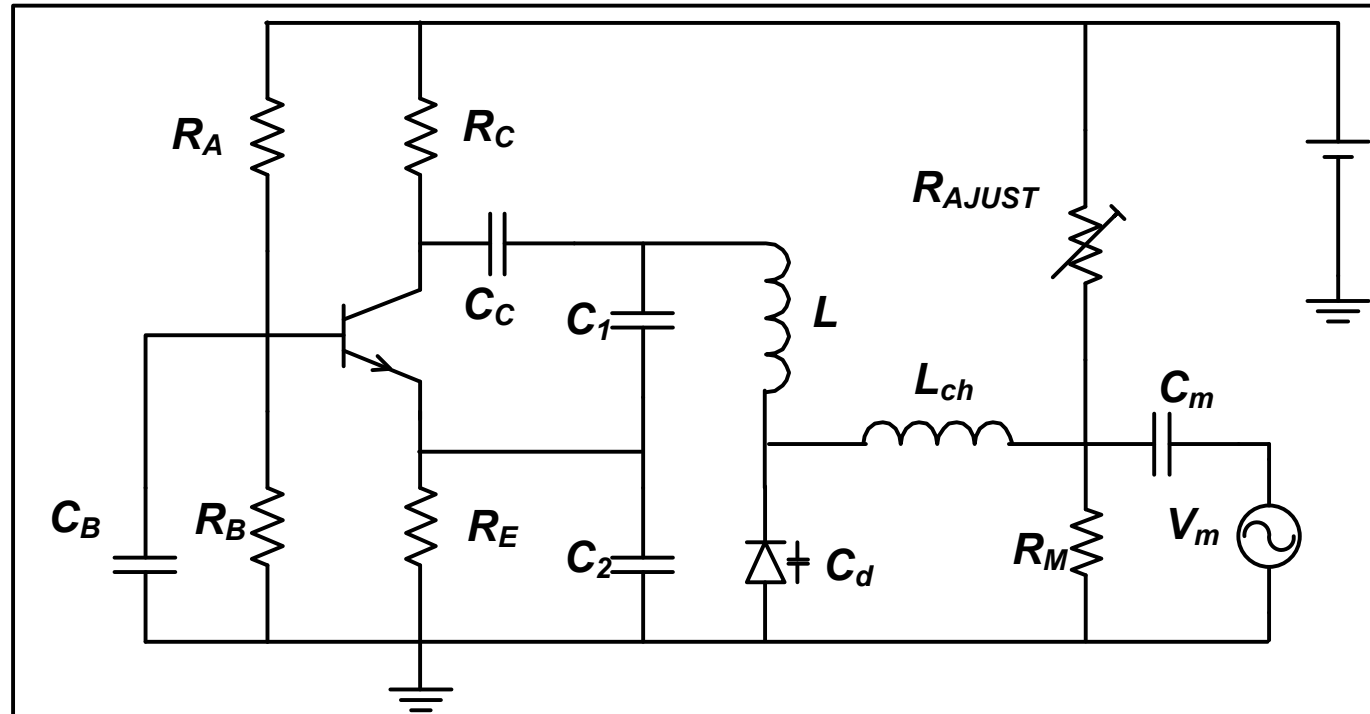
Los moduladores directos más utilizados son los osciladores senoidales, cuyas frecuencias se modifican variando la capacidad de un diodo *varactor* o *varicap*.

Ventajas: sencillos, económicos y fáciles de ajustar. Además se adaptan fácilmente a sistemas que tienen frecuencias controladas por una señal de referencia que proviene de un oscilador a cristal.

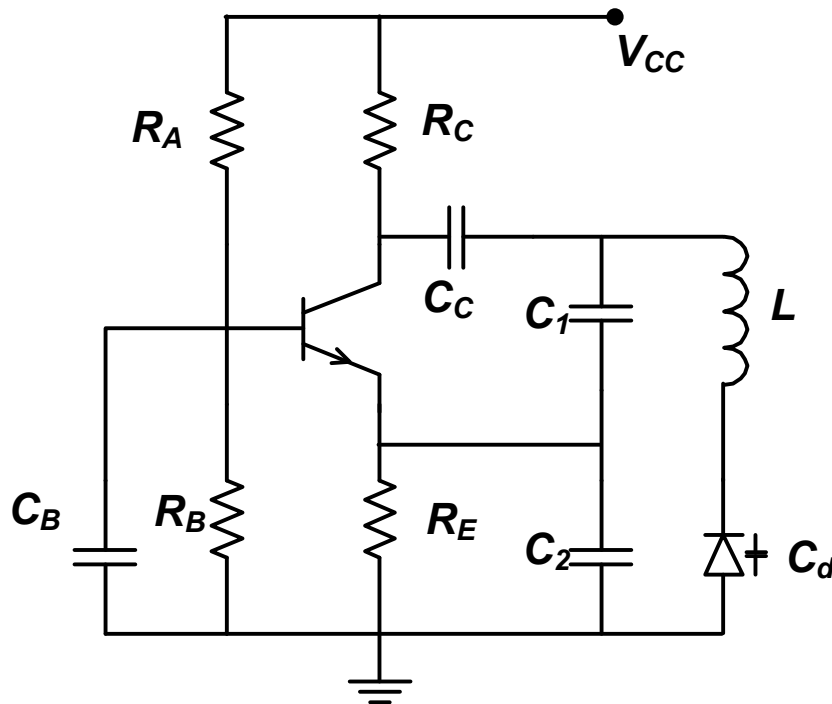
Requisitos a cumplir en el diseño:

- El oscilador debe ser capaz de tener desviaciones de frecuencia lo suficientemente grandes como para evitar etapas multiplicadoras en el transmisor.
- Las desviaciones de frecuencia del oscilador deben ser lineales en el intervalo de tensiones donde trabaja.
- La búsqueda de un criterio, que permita lograr una buena linealidad, con un error predecible y una desviación de frecuencia adecuada en un modulador de FM, es la meta de todo diseñador.

Modulador Directo de FM- Clapp



- La salida del modulador normalmente es tomada del colector del transistor.
- Se puede usar otras configuraciones de osciladores.
- El oscilador también puede ser implementado con un transistor de efecto de campo, un integrado u otro componente



- Es un oscilador Clapp, base común
- Frecuencia controlada por C_1 , C_2 , L y la capacidad de un diodo *varactor* o *varicap*.
- C_B y C_C , son condensadores de paso para la frecuencia de trabajo del oscilador.

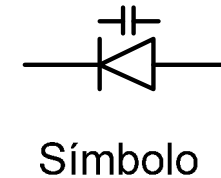
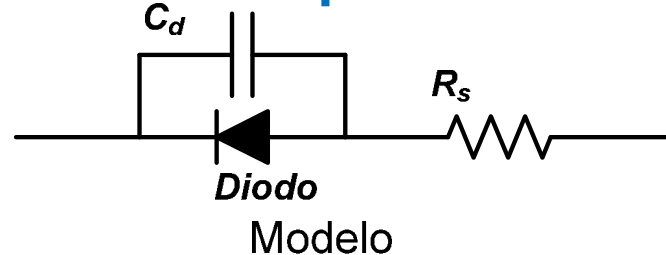
La frecuencia del oscilador es:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \sqrt{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_d}}$$

C_s es la capacidad serie resultante de C_1 y C_2 y su valor es:

$$C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Diodo varactor: Modelo simplificado:

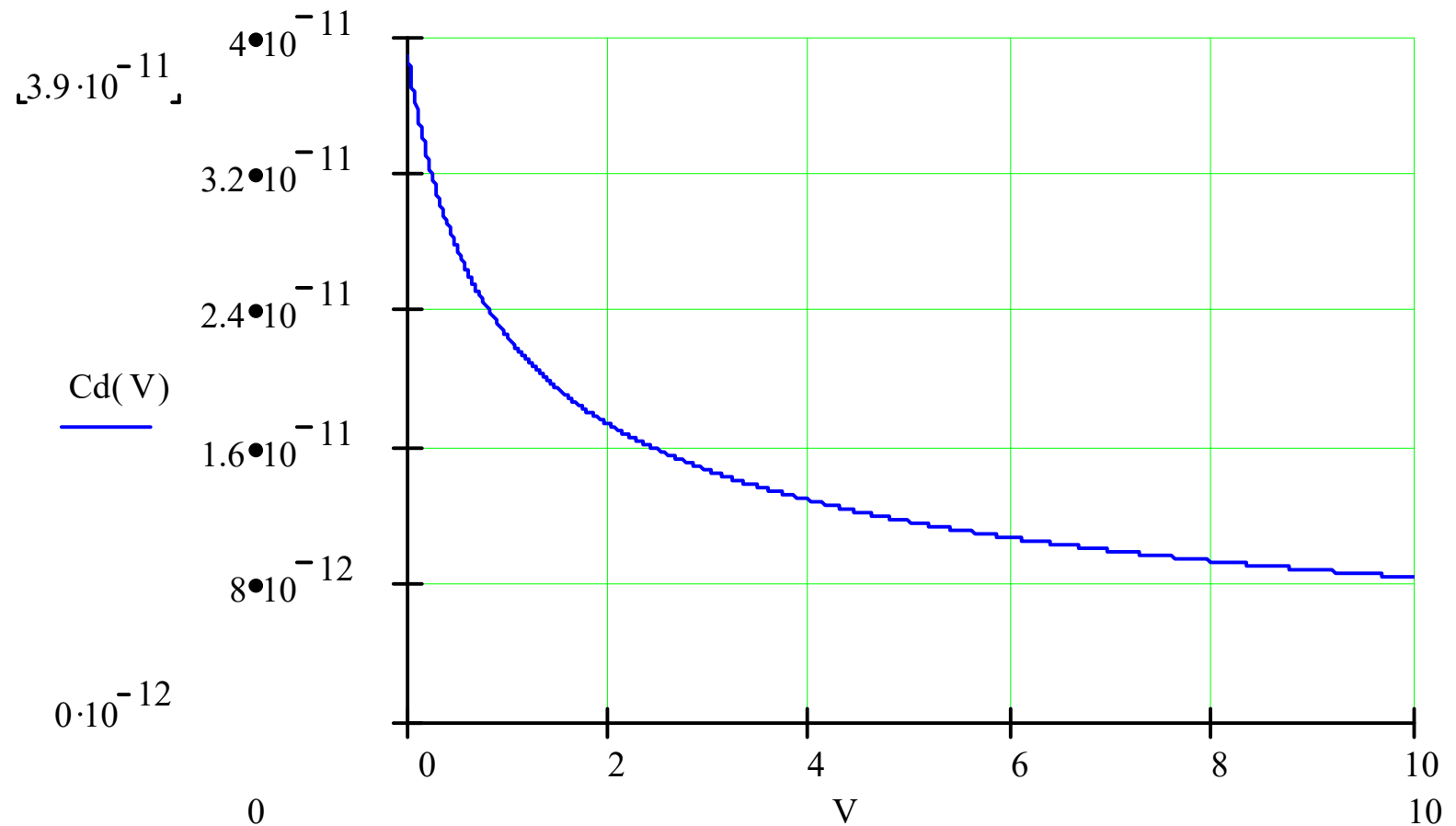


- R_s es despreciable (0,3 a 0,5 Ω)
- La capacidad C_d está definida por la expresión :

$$C_d = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V_d}{V_j}\right)^M}$$

- V_j es el potencial de juntura
- M es un coeficiente que depende del tipo de juntura que tiene el diodo.
- Para junturas abruptas se puede adoptar $V_j = 0,5$ y $M = 0,5$.
- C_0 es la capacidad del diodo cuando la tensión inversa aplicada al mismo es cero

Capacidad de un Diodo varactor en función de la frecuencia



De:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \sqrt{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_d}}$$

$$C_d = \frac{C_0}{\sqrt{1 + 2V_d}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \sqrt{\frac{1}{C_s} + \frac{\sqrt{1 + 2V_d}}{C_0}}$$

*Suponiendo que se usa un diodo varactor con juntura tipo abrupta

1. La frecuencia del oscilador no depende linealmente de la tensión aplicada al diodo.
2. Se debe operar al oscilador en una zona donde los incrementos de tensión son lo suficientemente pequeños, como para que se considere que el cambio de f con C_d y el de C_d con V son lineales.

Así, si $V_d=6V$ la tensión moduladora aplicada podrá ser mas grande que si se polariza al varicap con $V_d=2V$, sin salir de la zona lineal

Análisis de la respuesta del circuito resonante del modulador

$$K_f = \frac{df}{dV} \quad \text{Sensibilidad del modulador}$$

Como C_d depende de V y f  $K_f = \frac{df}{dC_d} \frac{dC_d}{dV}$

Si: $S_1 = \frac{df}{dC_d} \quad S_2 = \frac{dC_d}{dV}$ Entonces: $K_f = S_1 S_2$

Si se deriva la frecuencia en función de C_d , se obtiene:

$$\frac{df}{dC_d} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \left(\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_d} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(-\frac{1}{C_d^2} \right) C_d^{-2}$$

Luego de trabajar la expresión:

$$S_1 = \frac{df}{dC_d} = -\frac{1}{2} \frac{f}{(1+n) C_d}$$

Siendo n :

$$n = \frac{C_d}{C_s}$$

Si se deriva C_d en función de la tensión, se obtiene

$$C_d = \frac{C_0}{(1 + 2V_d)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{dC_d}{dV} = C_0 \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot (1 + 2V_d)^{-\frac{3}{2}} \cdot 2 = -\frac{C_0}{(1 + 2V_d)^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{(1 + 2V_d)}$$

Luego de trabajar la expresión:

$$S_2 = \frac{dC_d}{dV} = -\frac{C_d}{(1 + 2V_d)}$$

Reemplazando en la expresión de la sensibilidad y particularizando para un punto:

$$K_f = S_1 S_2 = \frac{1}{2} \frac{f_0}{(1 + n) (1 + 2V_d)}$$

Observaciones:

- K_f es mayor cuando los valores de V son pequeños y cuando los valores de n son decrecientes.
- Si V es chico K_f cambia rápidamente con la tensión. Esto produce un funcionamiento menos lineal en el modulador.
- Hay un límite en la práctica en el valor de V , se debe evitar llegar a valores próximos a 0. El varactor puede empezar a operar como un diodo
- La solución de mejorar la sensibilidad disminuyendo n también está acotada. Los valores que deben tener los capacitores están acotados por la frecuencia requerida por el oscilador y su amplitud de salida que debe ser adecuada a la función del oscilador.

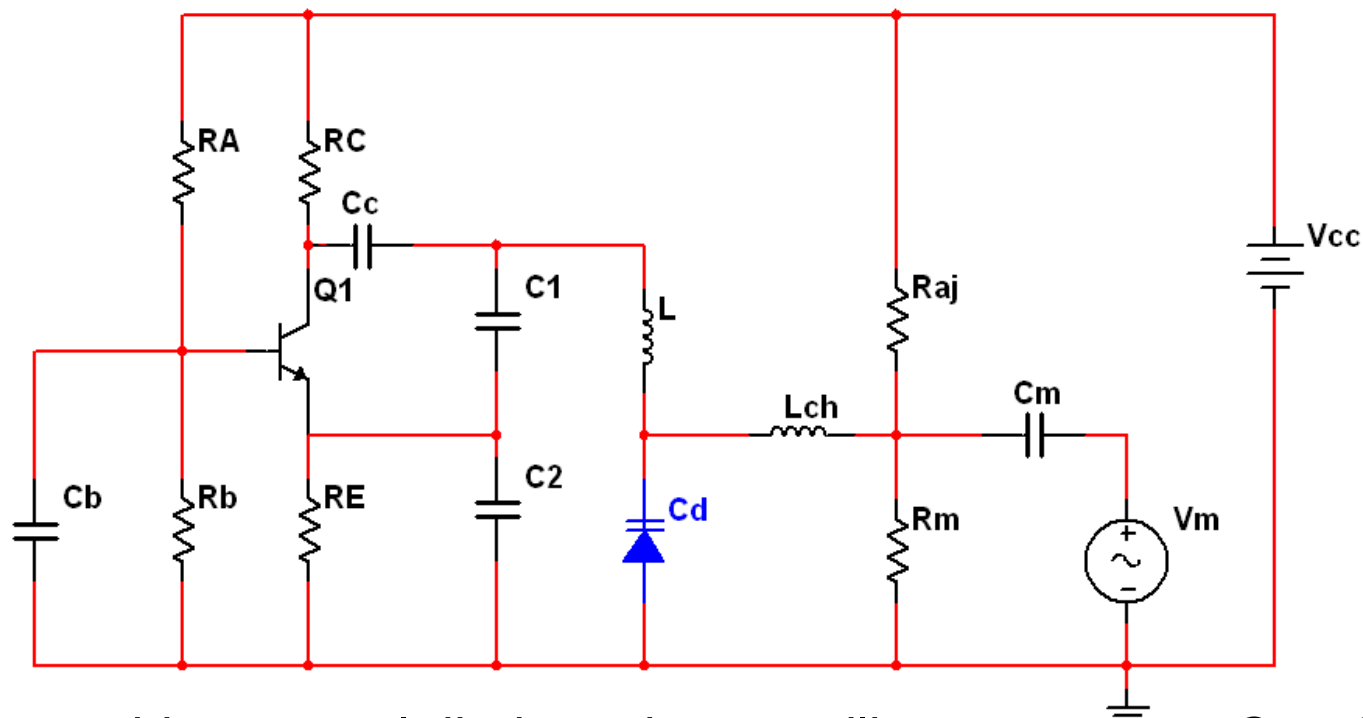
$$n = C_d / C_s$$

- La estabilidad de frecuencia del circuito depende de los componentes del circuito, y de la estabilidad de la tensión de sintonía V .

EJEMPLO

24

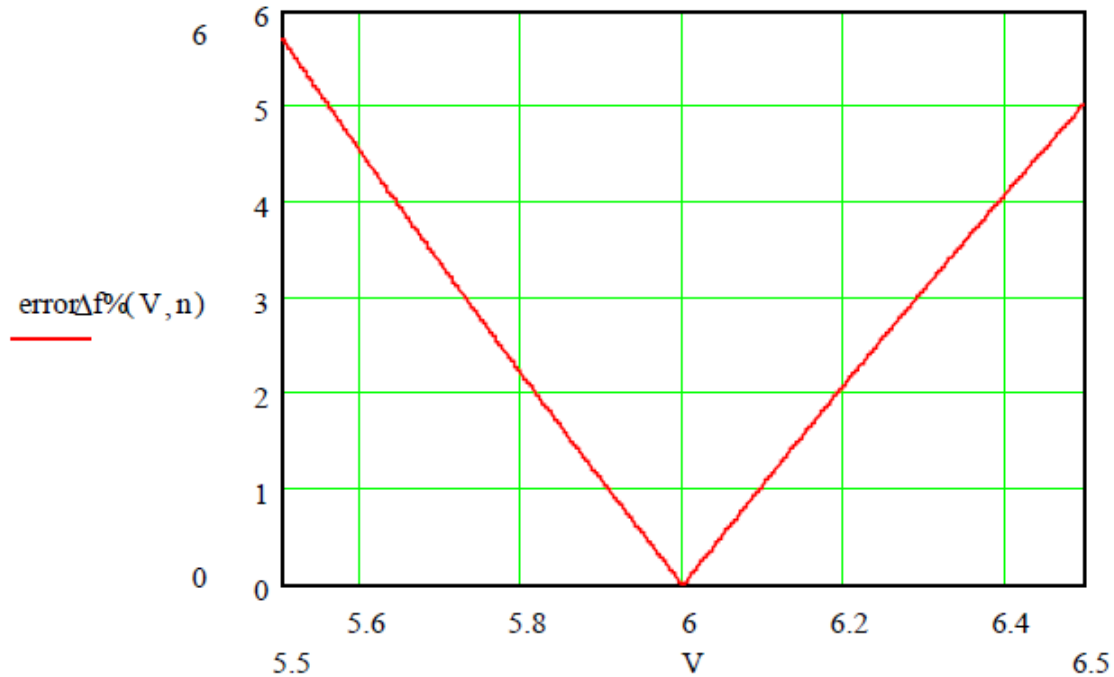
a) Diseñe un modulador de FM a partir de un oscilador tipo Clapp, que funciona a la frecuencia de 12 MHz. Indique para el mismo los valores de $\Delta f_{m\acute{a}x}$, para un error en la linealidad del 2,8 %.



a) Se considera que el diodo varicap a utilizar posee una $C_0 = 39\text{pF}$ y que es de unión abrupta, con la cuál la expresión de la capacidad del mismo se reduce a:

$$C_D = \frac{C_0}{(1 + 2V)^{1/2}}$$

El error porcentual de desviación en función de V responde a la siguiente figura: 25



De la figura se obtiene que el máximo valor de variación de V posible con una distorsión menor al 2,7% es de: $5,75 < V < 6,25$. → Se polarizará el varicap a 5,8V

Los rangos de variación de frecuencias correspondientes a estas tensiones sobre el varicap son:

$$K_f = \frac{\Delta f}{\Delta V} = 260 \Rightarrow \Delta f = K_f * \Delta V = 260 * 0,25 = 65 \text{ KHz}$$

Lo más adecuado será producir una variación de frecuencias de 37,5KHz para así colocar a continuación un multiplicador por 2.

Se obtiene de la ecuación que la tensión V_m deberá tener una amplitud máxima de:

$$\Delta V = \frac{\Delta f}{K_f} = \frac{37,5}{260} = 0,144V$$

La frecuencia de la portadora antes de pasar por el multiplicador es: $f_c = 6$ MHz. Este es el valor de frecuencia central que debe entregar el oscilador

Diseño del oscilador:

- Diseño del amplificador: Se adopta $A_v=10$
- Diseño de la red β :

a) Se debe cumplir resonancia, o sea $\Sigma x = 0$, de donde se obtiene la frecuencia de oscilación del circuito, que queda determinada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \sqrt{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_D}}$$

$$C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

b) Se debe cumplir el criterio de Barkhausen para osciladores:

$$|\beta \times A_v| = 1$$

$$\beta_s = \frac{V_f}{V_o} = \frac{I \times X C_2}{I \times (X C_1 + X C_2)} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{C_s}{C_1}$$

c)

- Se calcula el valor de C_D para la tensión de polarización propuesta, $_{27}$ de acuerdo al error requerido:

$$C_D = \frac{C_0}{(1+2V)^{1/2}} = \frac{39 pF}{(1+2 \times 5,8)^{1/2}} = 10,99 pF$$

- Se adopta $n=2$



$$n = \frac{C_D}{C_s} = 2$$



$$C_s = \frac{C_D}{2} = 5,5 pF$$

- Se obtiene L de la ecuación de resonancia: $L = 190 \mu Hy$.

Como

$$\beta = \frac{1,05}{A_v} = 0,105 = \frac{C_s}{C_1}$$



$$C_1 = \frac{C_s}{0,105} = 52,38 pF$$

$$C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

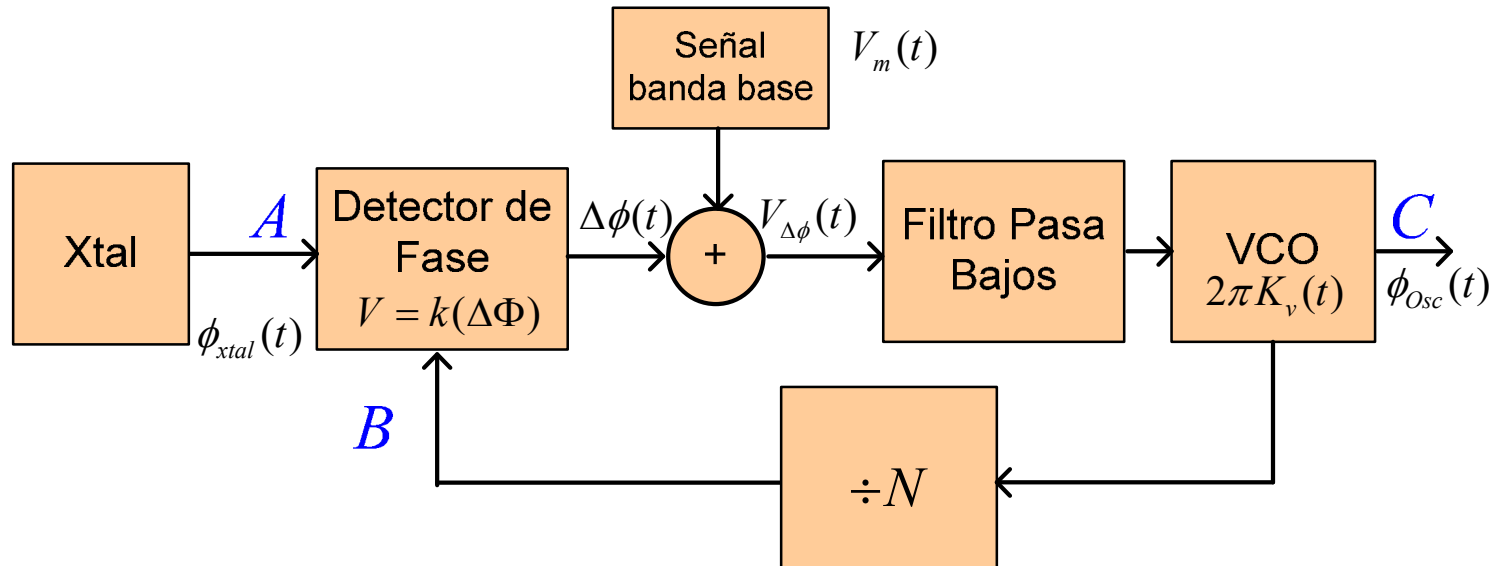


$$C_2 = \frac{C_1 C_s}{C_1 - C_s} = 6,14 pF$$

Modulador de FASE con PLL

28

Para obtener frecuencia muy estable (para VHF, UHF, etc.)



Cuando el PLL está enganchado:

$$\phi_{osc}(\omega) \approx N \cdot \phi_{Xtal}(\omega) + N \frac{V_m(\omega)}{K_{\Delta\phi}}$$

Entonces:

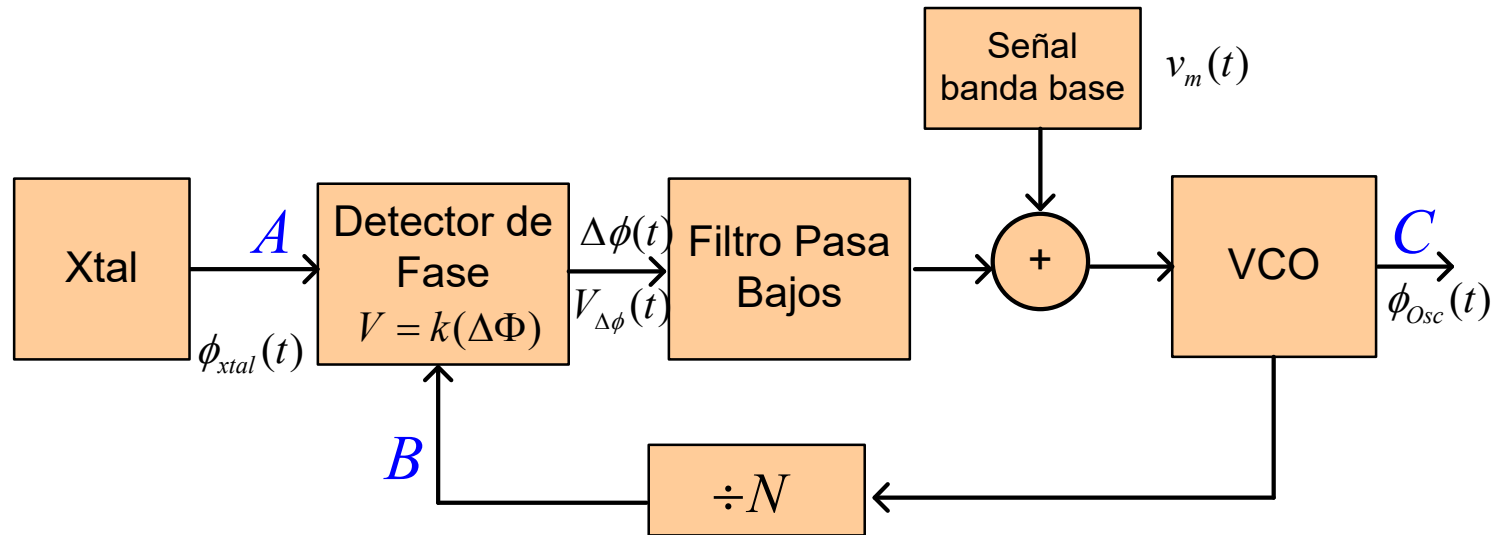
$$V_{osc} \approx V_{osc} \cdot \text{sen} \left(N \cdot \phi_{Xtal}(\omega) + V_m(\omega) \frac{N}{K_{\Delta\phi}} \right)$$

**Señal
modulada en
fase!!!!**

Modulador de FRECUENCIA con PLL

29

Para obtener frecuencia muy estable (para VHF, UHF, etc.)



Condición de diseño del filtro: *su frecuencia de corte debe ser mucho menor que la mínima frecuencia de v_m*

Entonces:

$$V_{osc}(t) \approx V_{osc} \cdot \text{sen} \left(N \cdot \phi_{Xtal}(t) + 2\pi K_v \int V_m(t) dt \right)$$

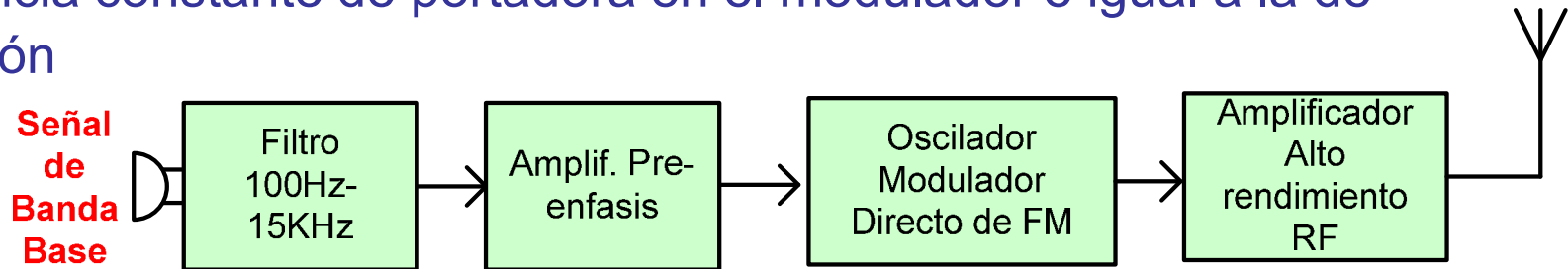
Señal modulada
en frecuencia!!!

- Modulación a nivel de señal.
- Como no hay información en la amplitud, los amplificadores de potencia de RF no tienen que ser lineales.
- La modulación no es necesario que se realice a frecuencia de portadora fija.
- La frecuencia de la portadora en el modulador no es necesario que coincida con la de transmisión.
- Existen muchos tipos posibles de estructura, en función de que:
 - Que la frecuencia del modulador coincida con la de transmisión o sea distinta.
 - Que la frecuencia de transmisión sea variable o fija.
 - Que la frecuencia del modulador sea variable o fija.
 - Que las modificaciones de frecuencia se hagan por conversión (mezcla), multiplicación o con PLLs.

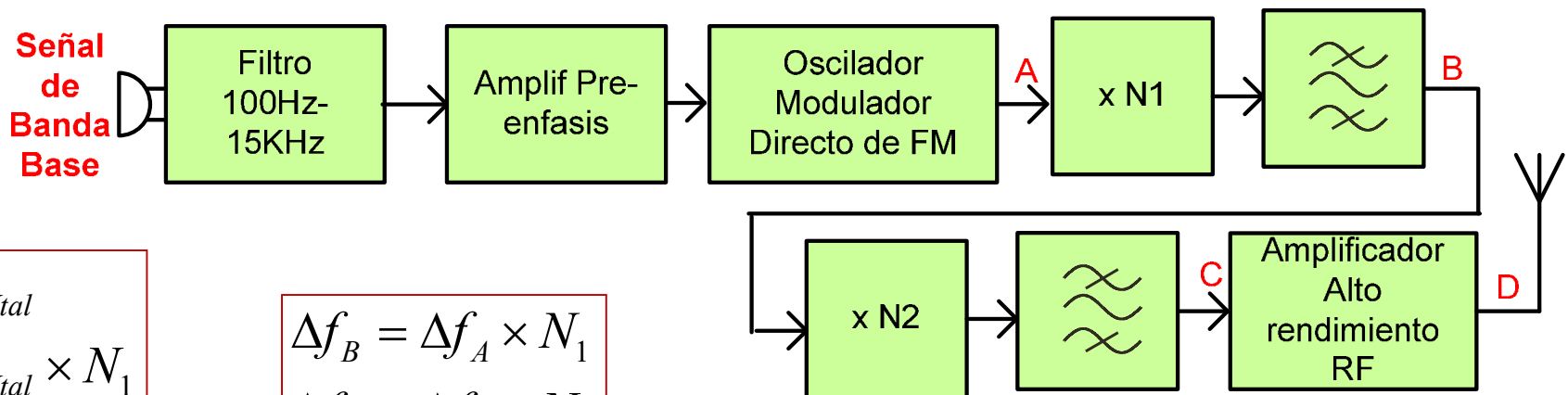
Estructuras de transmisores de FM

31

- Frecuencia constante de portadora en el modulador e igual a la de transmisión



- Frecuencia constante de portadora en el modulador, pero distinta a la de transmisión



$$f_A = f_{Xtal}$$

$$f_B = f_{Xtal} \times N_1$$

$$f_C = f_B \times N_2$$

$$\Delta f_B = \Delta f_A \times N_1$$

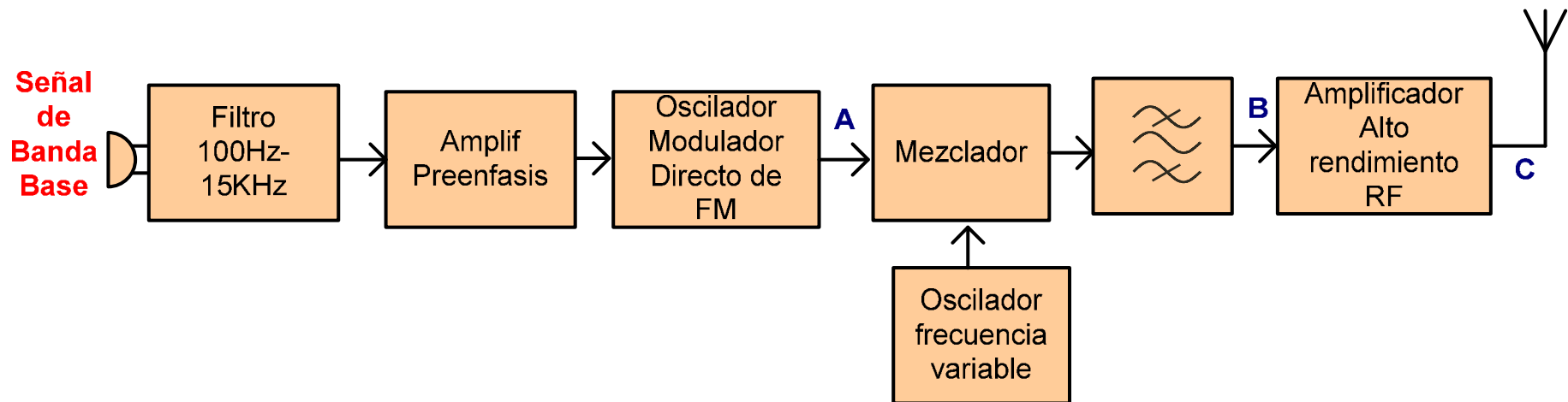
$$\Delta f_C = \Delta f_B \times N_2$$

¡¡Ojo!!: la desviación de frecuencia se multiplica por el mismo factor que la frecuencia central

Estructuras de transmisores de FM

32

- Frecuencia constante de portadora en el modulador, distinta a la de transmisión. Frecuencia de transmisión variable por mezcla



La desviación de frecuencia no cambia al cambiar la sintonía!!!!

$$f_A = f_{Xtal}$$

$$f_B = f_{Xtal} + f_{OLv}$$

$$f_C = f_B$$

$$\Delta f_A = \Delta f_B = \Delta f_C$$

$$AB_A = AB_B = AB_C$$

Estructuras de transmisores de FM

33

Realización práctica con un circuito integrado MC2833

Figure 2. Single Chip VHF Narrowband FM Transmitter

