

# Mezcladores

Universidad Tecnológica Nacional de Argentina - F. R. Córdoba  
Departamento de Electrónica - Electrónica Aplicada III

Daniel Rabinovich [drabinovich@electronica.frc.utn.edu.ar](mailto:drabinovich@electronica.frc.utn.edu.ar)

Ramón Oros [roros@electronica.frc.utn.edu.ar](mailto:roros@electronica.frc.utn.edu.ar)

Claudio Paz [cpaz@frc.utn.edu.ar](mailto:cpaz@frc.utn.edu.ar)

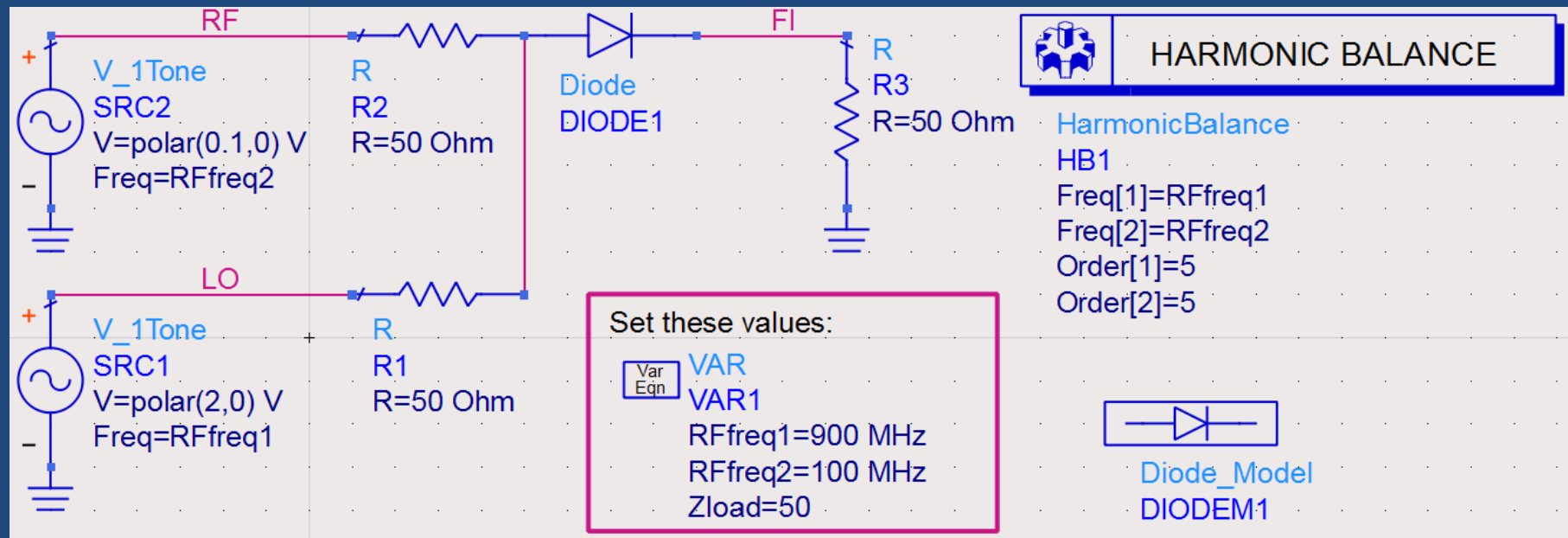
Año 2016

- Definición

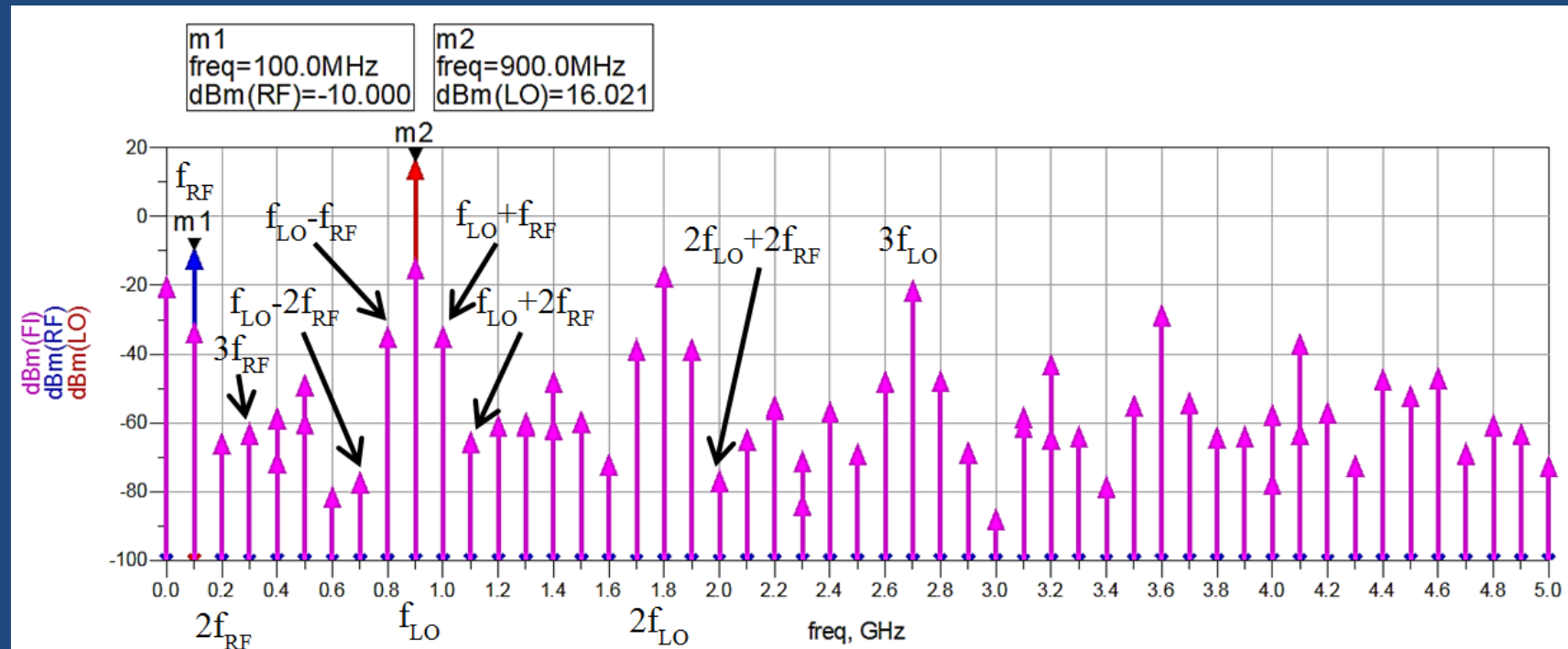
- Un mezclador es un dispositivo electrónico que a partir de dos señales de entrada de frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  respectivamente, permite obtener a su salida otras de frecuencias  $mf_1 + nf_2$
- $n$  y  $m$  son números enteros, siendo las frecuencias más deseables  $f_1 + f_2$  y  $f_1 - f_2$  si  $f_1 > f_2$  o viceversa
- Cualquier dispositivo alineal puede ser un mezclador, diodos, transistores bipolares, FETs, etc.
- La no linealidad es necesaria para producir nuevas frecuencias
- La elección del dispositivo y del circuito depende a saber de
  - ganancia o pérdida de conversión
  - rango dinámico
  - ancho de banda
  - figura de ruido
  - aislación entre los puertos
  - generación de frecuencias indeseables
  - costo
  - adaptación de sus puertos

- Circuito mezclador básico

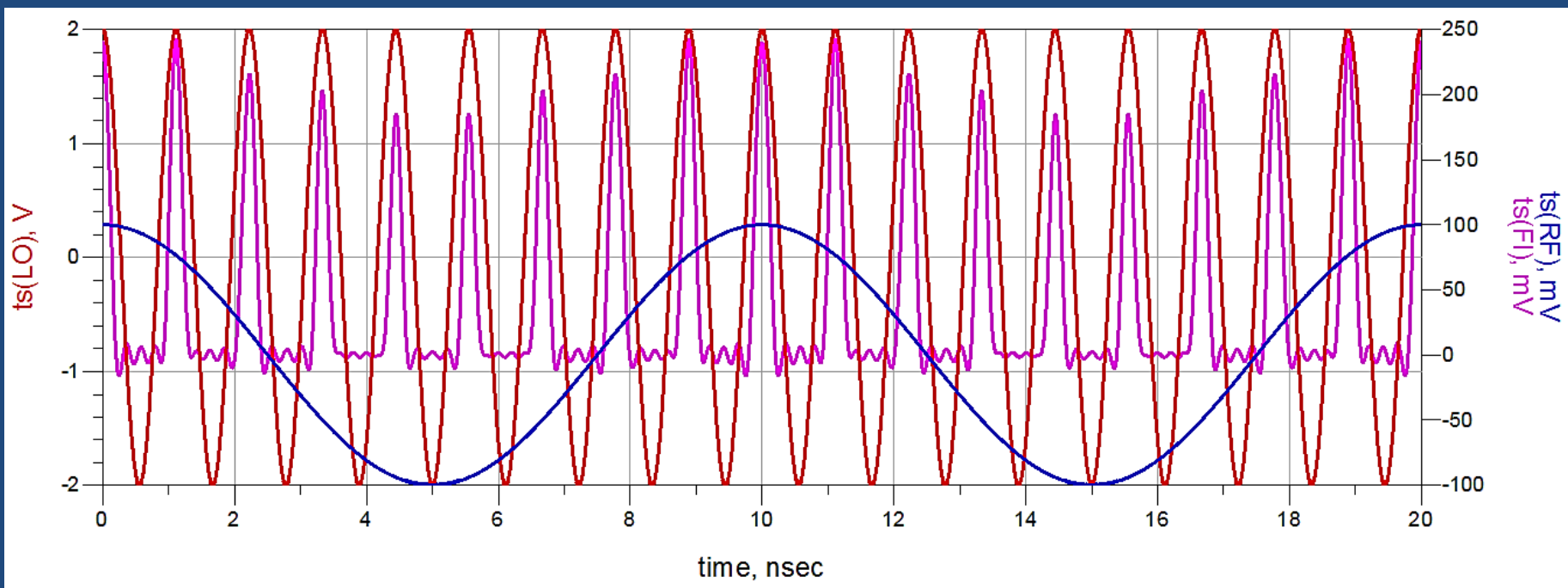
- Está simulado con ADS 2014.01 de Keysight (ex Agilent)
- Si las fuentes estuvieran en serie el efecto sería similar
- Es tradición denominar a los terminales RF, LO y FI aunque no sea su destino un Rx heterodino, como en este caso que es un modulador de AM
- En las diapositivas siguientes se mostrará las formas de onda en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo



- Muchos tonos del espectrograma son despreciables,  $-100 \text{ dBm} = 0,1 \text{ pW}$
- Las frecuencias deseadas son  $f_{LO} + f_{RF}$ ,  $f_{LO}$ , y  $f_{LO} - f_{RF}$ , hay muchas señales espurias que compiten en amplitud, sin duda que este circuito, no es muy bueno como modulador de AM
- las frecuencias combinadas del tipo  $mf_{LO} + nf_{RF}$  se llaman productos de intermodulación de orden  $k$ , donde  $k = |m| + |n|$
- En rigor el orden está dado por el exponente de la potencia del término de la serie de Taylor que describe la función de transferencia del dispositivo a lineal

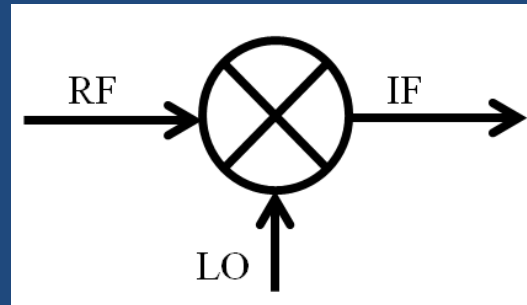


- Hay que tener en cuenta que la amplitud de la tensión del OL es 20 veces mayor que la de la señal de RF
- En el oscilograma se aprecia a simple vista que la salida de FI tiene una componente de CC, además de las dos frecuencias de entrada  $f_{LO}$  y  $f_{RF}$
- Si se imagina la señal de FI quitándole la componente de CC y la componente de baja frecuencia  $f_{RF}$  con un pequeño capacitor en serie, resulta una señal de AM con bajo índice de modulación compuesta por  $f_{LO} + f_{RF}$ ,  $f_{LO}$ , y  $f_{LO} - f_{RF}$  y los productos de orden mayor que 2



- Sobre el símbolo

- El símbolo de un mezclador representa el producto

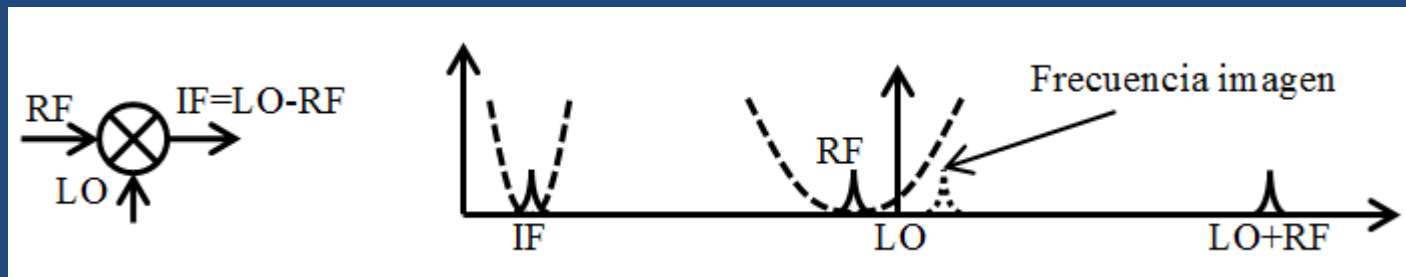


- El espectro del producto temporal de dos señales sinusoidales da como resultado las frecuencias suma y diferencia de las frecuencias de las señales de entrada, algo que normalmente se espera que realice un mezclador

- $\cos(\omega_1 t) \times \cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 + \omega_1)t] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 -$

- Mezclador propiamente dicho

- Se usan en los Rx heterodinos para trasladar la RF a la FI
- Puede haber más de una cadena de FI, pero raramente más de tres
- Cada cadena requiere de un mezclador y un oscilador



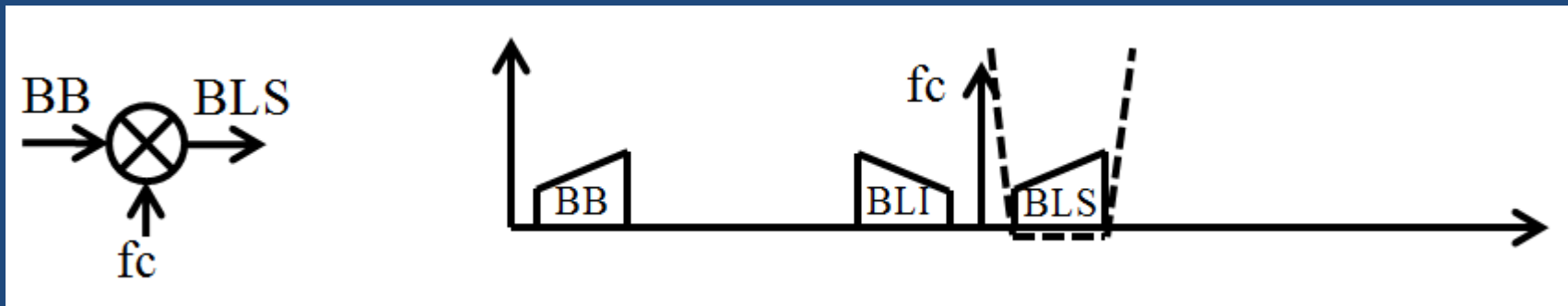
- El mezclador produce la suma y la diferencia, pero solo esta última se ubica en la frecuencia del filtro de la IF
- Una emisora con la frecuencia imagen también produciría una  $f$  diferencia en IF
- Para evitar esto, en los receptores se suele usar un filtro de RF que atenúa la frecuencia imagen si la hubiera.
- Existen mezcladores que tienen implementado algún mecanismo para eliminar en la salida de FI la suma o la resta, en este caso podría ser útil eliminar la suma
- Acá sería una mala inversión ya que la suma está muy alejada del canal de IF como para causar algún inconveniente.

- Detector de producto
  - El mezclador recibe este nombre cuando se aplica como mezclador de un receptor de BLU
  - Al oscilador correspondiente se lo denomina oscilador de frecuencia de batido (BFO en Inglés)



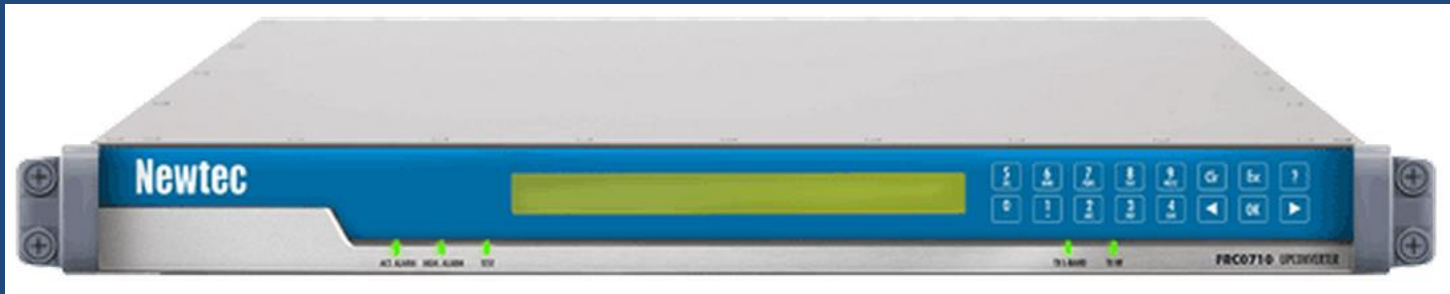


- Modulador para la generación de BLU
  - Modulador para la generación de BLU (específicamente BLS) por el método del filtrado



- Este es un caso típico donde es necesario un modulador balanceado para que a la salida se elimine la portadora
- De esta forma se disminuye la exigencia en la pendiente del flanco del filtro para la eliminación de la portadora y de la BLI

- Upconverter y downconverter
  - El primero se usa para trasladar una señal a frecuencias más elevadas y el segundo lo inverso
  - Estas denominaciones se aplican para equipos completos que además de un mezclador, incluyen LO con sintetizador, filtros, amplificadores, y circuitos digitales para programación y control
  - También todo lo necesario para eliminar a la salida los productos de mezcla indeseables
  - Su uso más común es en aplicaciones para comunicaciones satelitales, para subir y para bajar la señal del satélite.



## – Características del Upconverter FRC0710

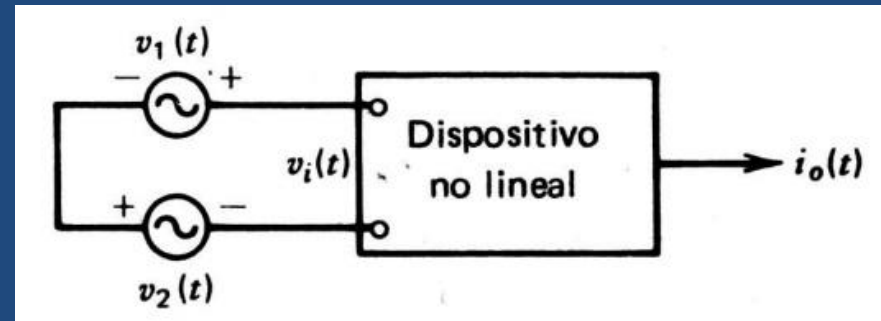
- 1) Ágil up-conversion de IF a la banda L
- 2) Up-conversion opcional a banda C, Ku o DBS
- 3) Resolución de frecuencia ultra fina en banda L (48Hz)
- 4) Frecuencia de entrada IF conmutable entre 70 MHz y 140 MHz
- 5) Inversión del espectro conmutable
- 6) Estabilidad de frecuencia muy alta
- 7) Muy baja producción de señales espurias
- 8) Satisface los requerimientos de ruido de fase para Intelsat IBS/  
Eutelsat SMS
- 9) Alta linealidad en toda la banda ...etc.

- Teoría básica

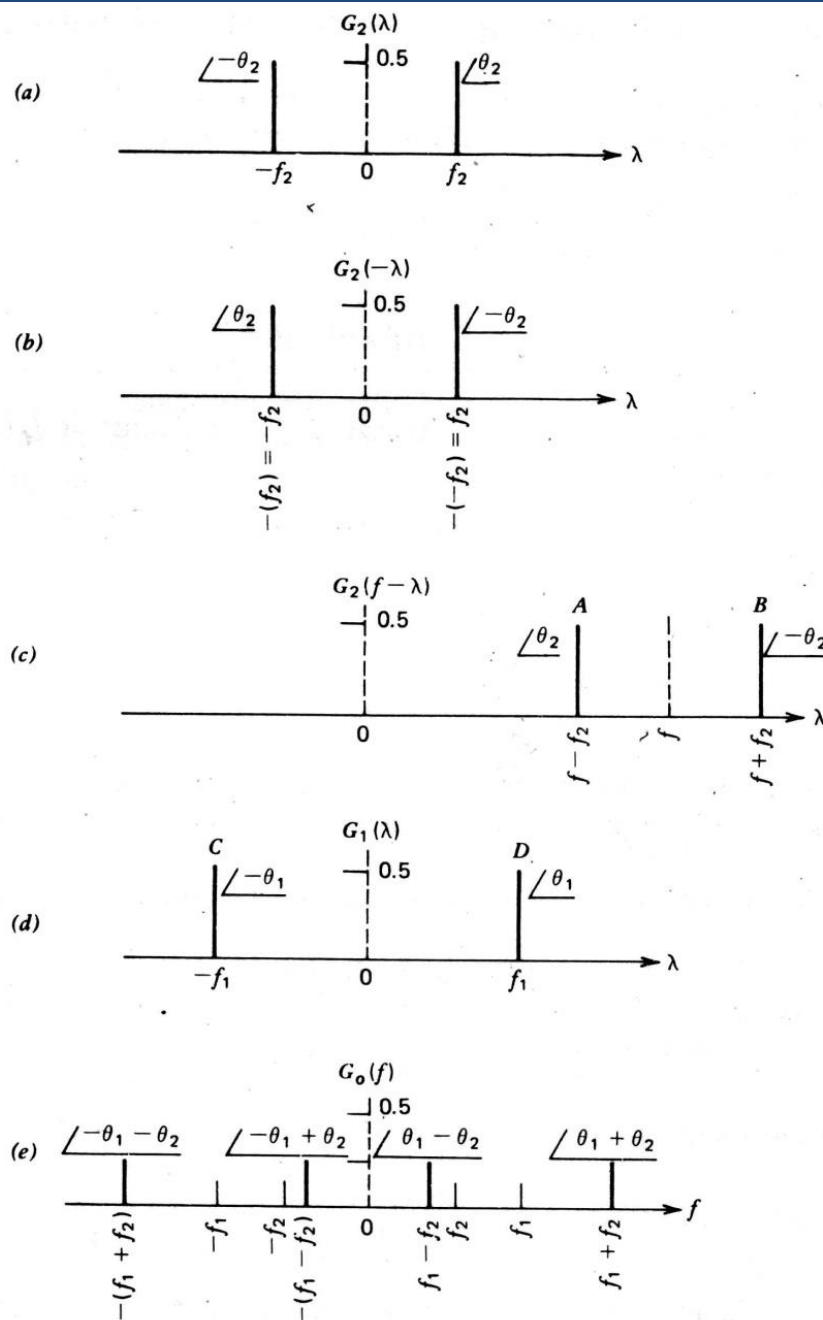
- La relación entrada salida en el dominio del tiempo se puede expresar por una serie de Taylor

- $i_o(t) = I_0 + av_i(t) + b[v_i(t)]^2 + c[v_i(t)]^3 + \dots$

- Si la entrada tiene una sola  $f$  la no linealidad genera armónicos y modifica la componente de CC
- Si la entrada tiene varias  $f$ , además de las armónicas se generarán frecuencias sumas y diferencias de las  $f$  de entrada y de sus armónicos
- Las frecuencias suma y diferencia generadas por el término cuadrático se llaman productos de intermodulación de segundo orden, las originadas por el término cúbico, productos de intermodulación de tercer orden, etc.
- Un dispositivo con respuesta cuadrática es ideal para ser usado como un mezclador, ya que produce una mínima cantidad de  $f$  indeseables
- En general en los mezcladores de recepción solo se desea a la salida la  $f$  diferencia
- los armónicos y las mezclas no deseadas se deben eliminar mediante filtrado u otros medios (simetrías)



- Por simplicidad considere una característica de transferencia definida por
  - $i_0(t) = av_i(t) + b[v_i(t)]^2$  y una entrada  $v_i(t) = V_1 \cos(\omega_1 t) + V_2 \cos(\omega_2 t)$
- La corriente de salida resulta
  - $i_0(t) = aV_1 \cos(\omega_1 t) + aV_2 \cos(\omega_2 t) + bV_1^2 \cos^2(\omega_1 t) + bV_2^2 \cos^2(\omega_2 t) + 2bV_1 V_2 \cos(\omega_1 t) \cdot \cos(\omega_2 t)$
- Aplicando una igualdad trigonométrica al 3ro y 4to término
  - $bV_1^2 \cos^2(\omega_1 t) = \frac{b}{2} V_1^2 (1 + \cos(2\omega_1 t))$
- Al igual que los dos primeros términos lineales estas componentes de CC y 2do armónico deben ser eliminadas
- En el 5to término se puede hallar lo deseado
  - $2bV_1 V_2 \cos(\omega_1 t) \cdot \cos(\omega_2 t) = bV_1 V_2 \{ \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] + \cos[(\omega_1 +$



## • Adaptación gráfica de la integral de convolución

– Permite evaluar en forma simple la  $f$ , amplitud y fase de las componentes de salida

– Par de transformadas de Fourier

$$\bullet G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi f t} df$$

$$\bullet f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi f t} df$$

– Lo que hace el mezclador

$$\bullet f_0(t) = f_1(t) \cdot f_2(t)$$

– Teorema de convolución

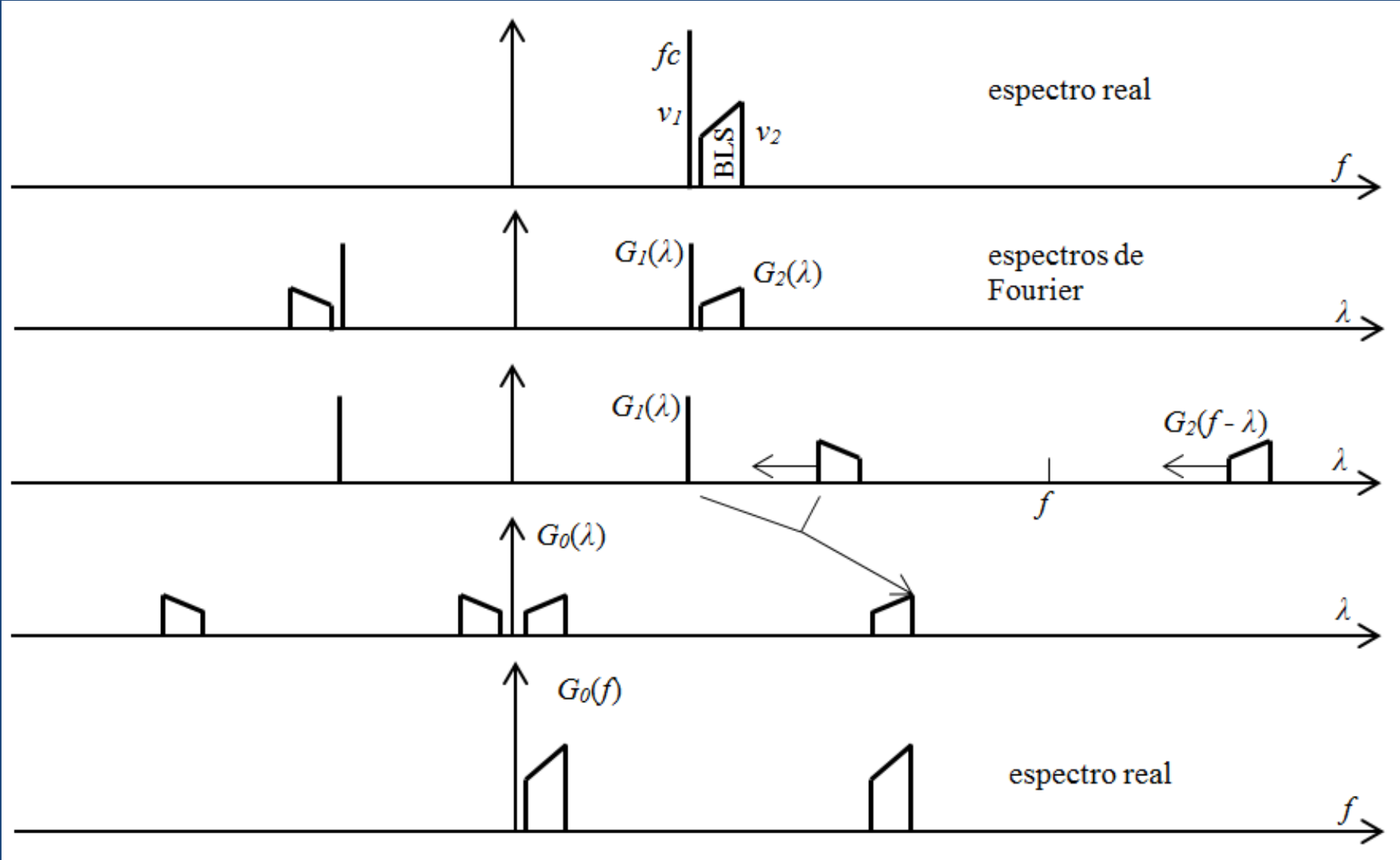
$$\bullet G_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} G_1(\lambda) \cdot G_2(f - \lambda) d\lambda$$

• Supóngase que

$$\bullet f_1(t) = \cos(\omega_1 t + \theta_1)$$

$$\bullet f_2(t) = \cos(\omega_2 t + \theta_2)$$

- Ejemplo: espectro producido por un detector de producto aplicando la convolución gráfica

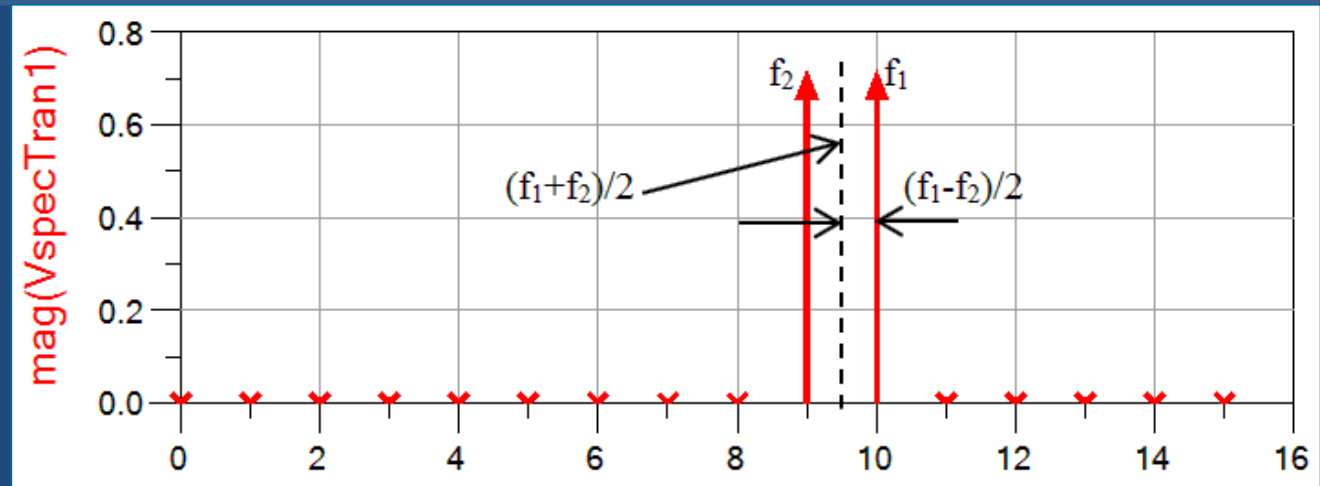


- Mezcladores balanceados, simétricos o equilibrados
  - No es aceptable que una componente de la misma frecuencia que la señal aplicada a un terminal aparezca en otro terminal
  - Como se mostró en la [fig](#) generar BLU por el método del filtrado es muy conveniente que la portadora esté bien atenuada a la salida, disminuyendo la exigencia del filtro y por ende su costo
  - Construyendo el mezclador con un número par de dispositivos dispuestos en forma simétrica es posible eliminar, o atenuar algunas frecuencias o armónicos de la señal aplicada en un terminal en el otro
  - No es conveniente que la señal del LO aparezca en el terminal de IF ni en el terminal de RF, tampoco es conveniente que la señal de RF pase al terminal de IF
  - El grado de dificultad para que esto suceda se llama aislación entre terminales
  - Por el balanceo o equilibrio los mezcladores se clasifican en
    - 1) de terminación única
    - 2) de balanceo simple
    - 3) de balanceo doble

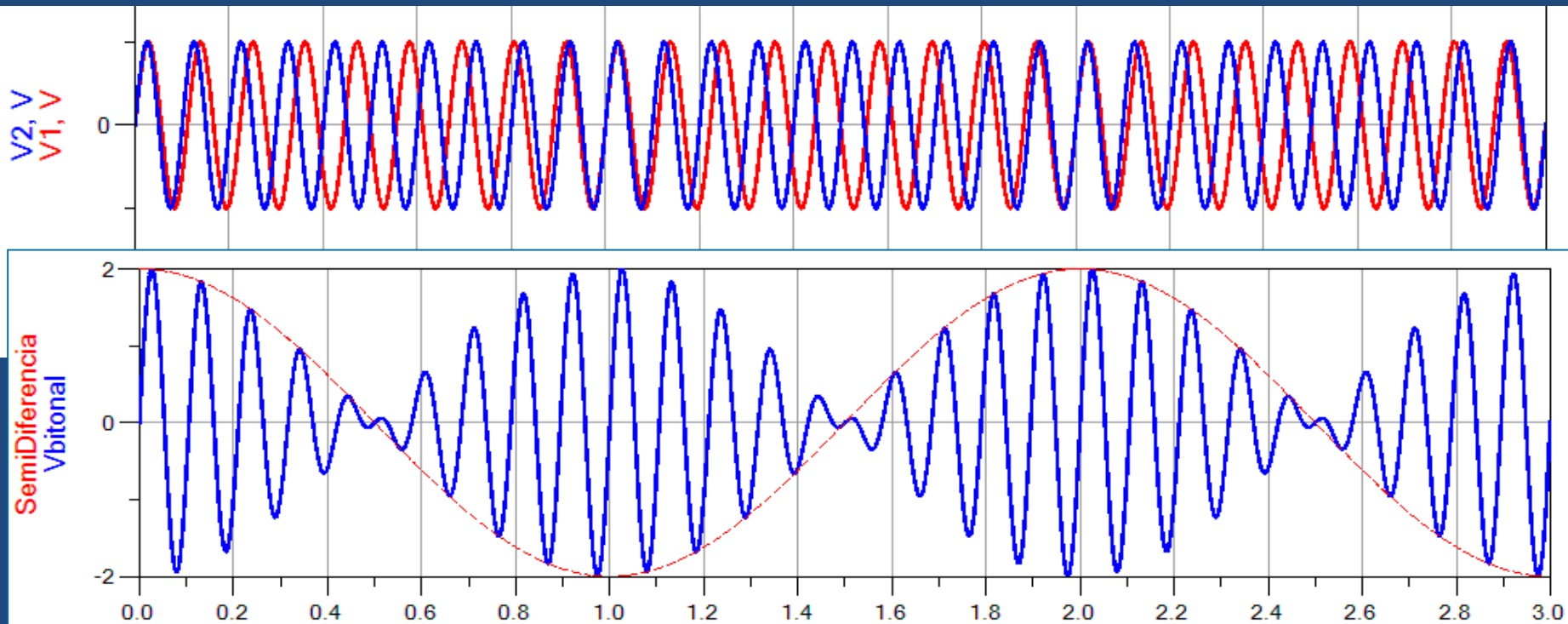


- Señal bitonal

- Es una conocida señal de prueba de equipos

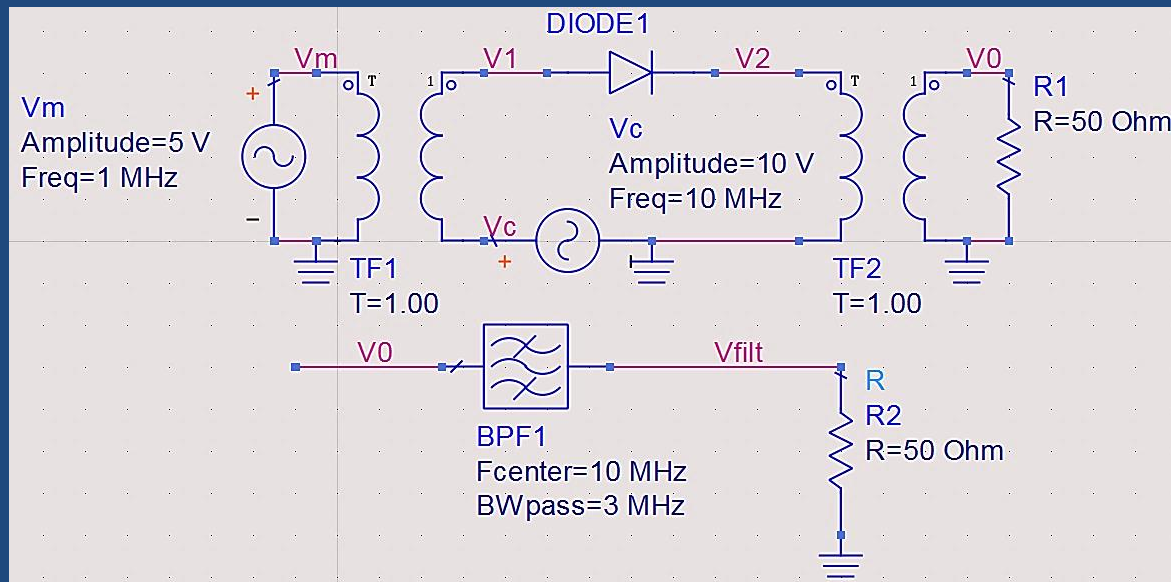


- Nuestro objetivo es reconocerla gráficamente para evitar futuros desarrollos matemáticos (tiempos en  $\mu\text{s}$  y  $f$  en MHz)

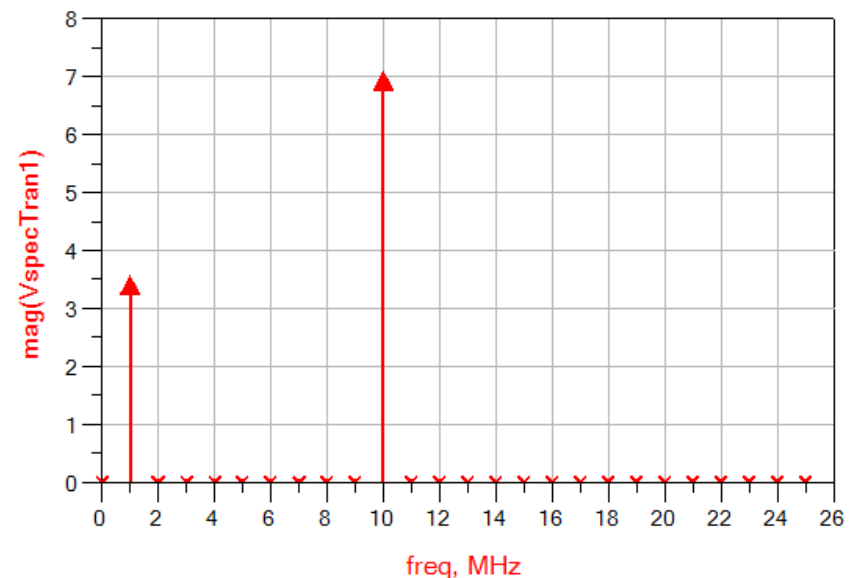
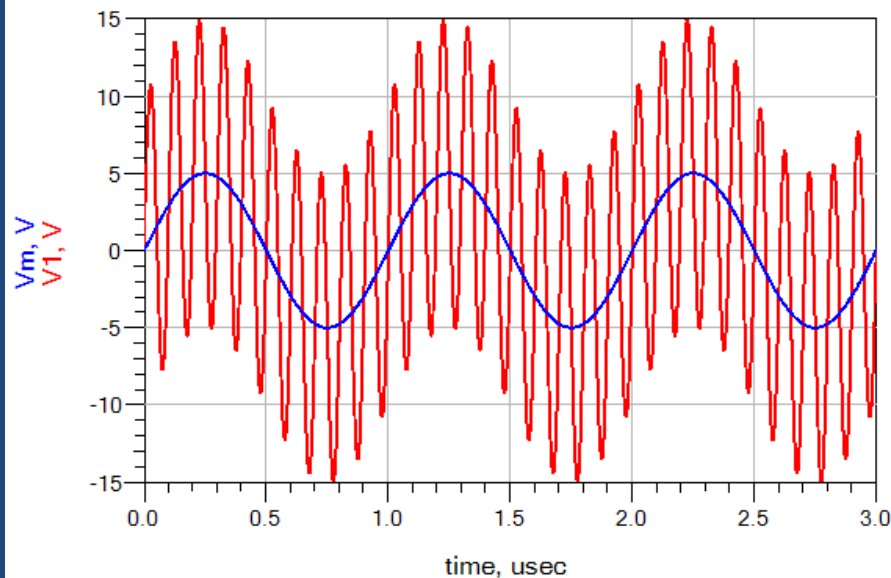


- Mezclador de terminación única
  - Son aquellos mezcladores que usan un único dispositivo alineal
    - Puede ser un diodo o un transistor
  - Al tener un solo dispositivo no hay simetrías que permitan eliminar frecuencias no deseadas en alguno de los terminales
  - Es totalmente aceptable en aplicaciones no muy comprometidas con la supresión de señales indeseadas
  - Usando transistores se puede conseguir algunos niveles de aislación interesantes
    - Por la unilateralidad de los dispositivos más que por simetría

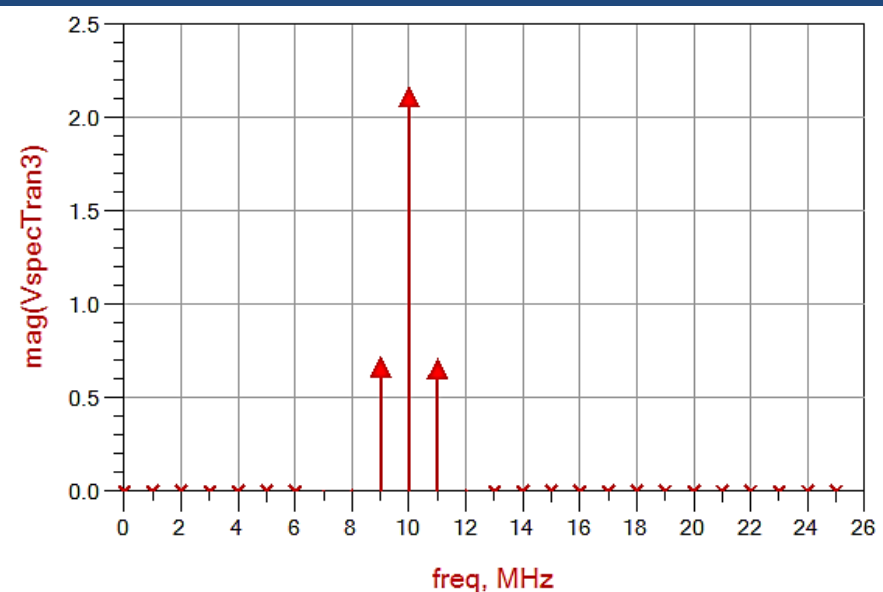
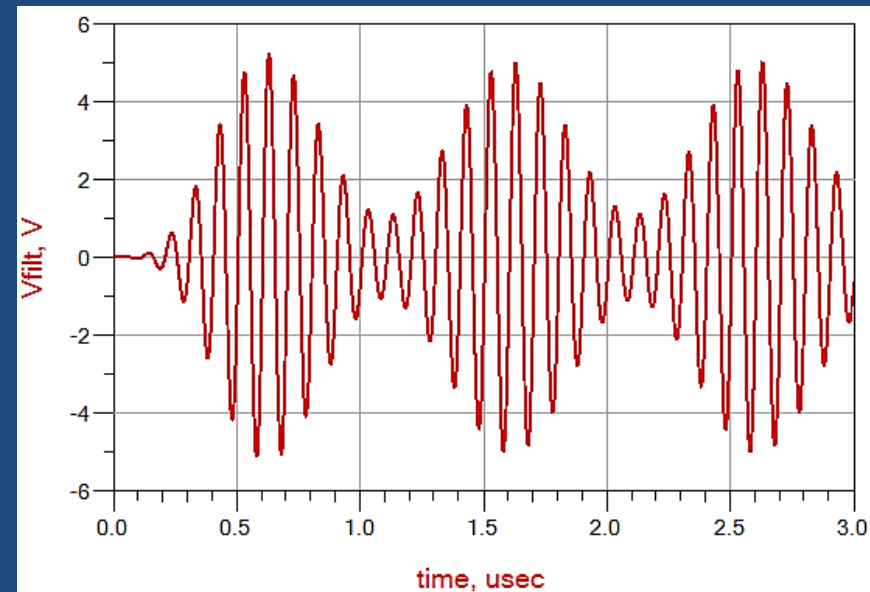
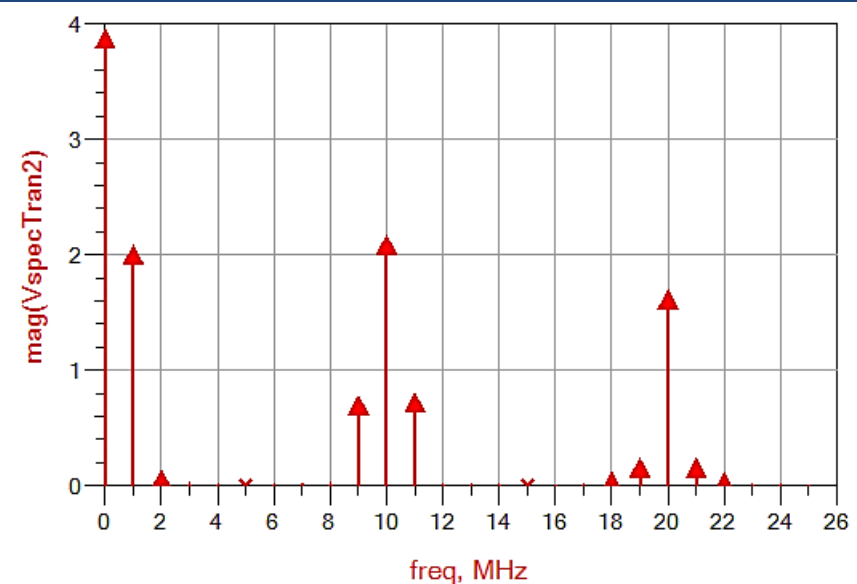
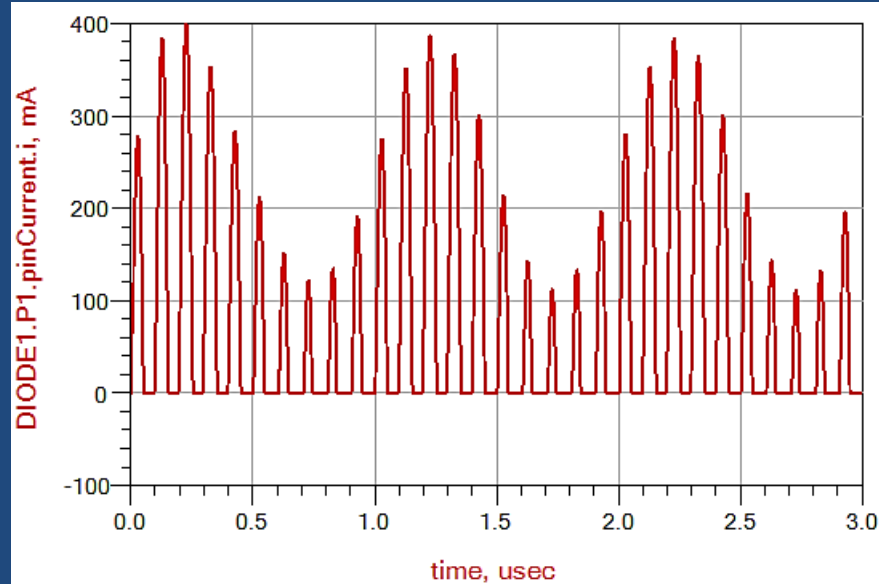
# • Mezclador de terminación única a Diodo



- Supóngase un modulador de AM
- La característica fuertemente alineal del diodo permite la circulación de  $I$  en un solo sentido
- El bloque BPF1 se agrega para eliminar componentes indeseadas

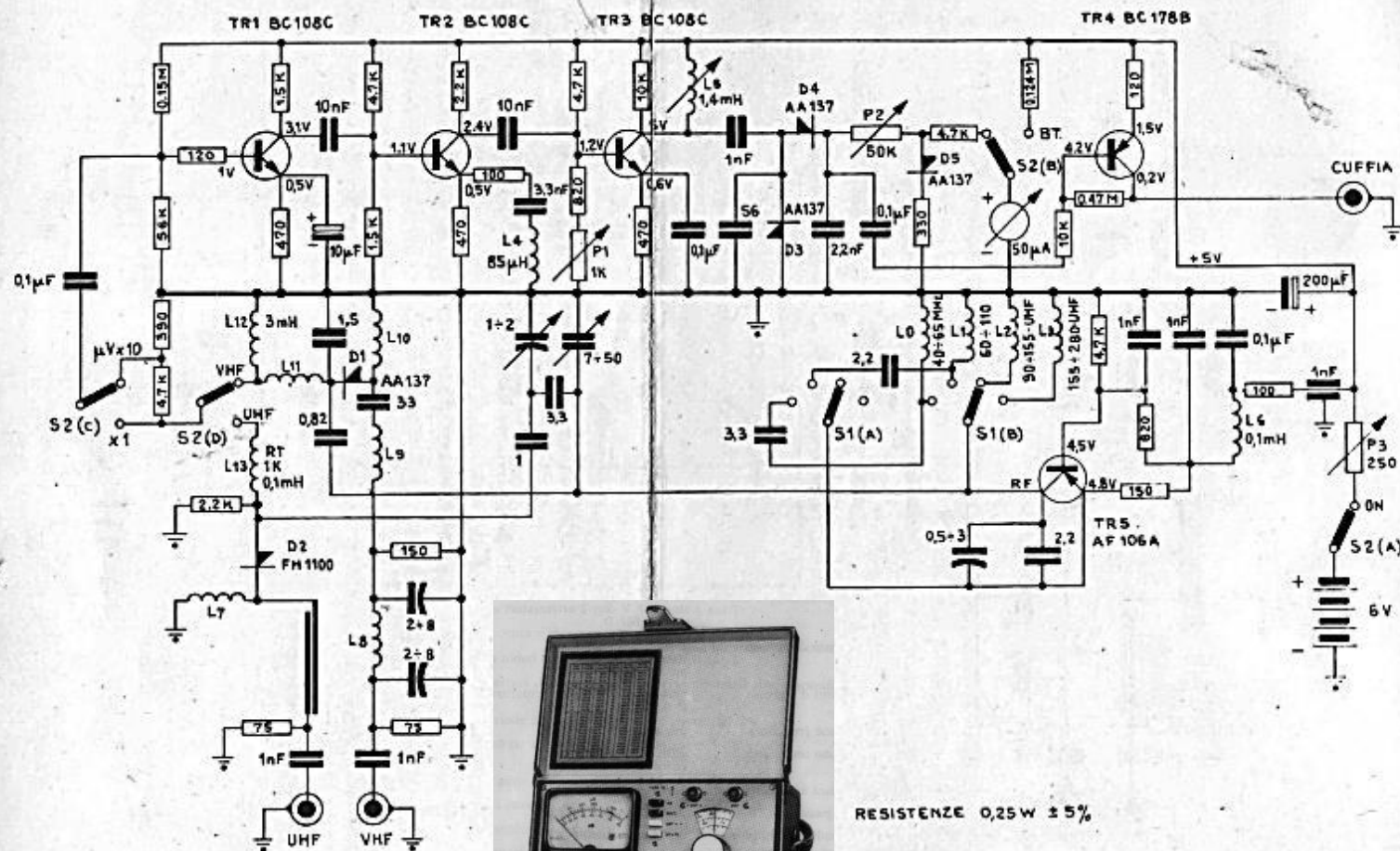


# – Oscilogramas y espectrogramas antes y después del filtro pasa banda

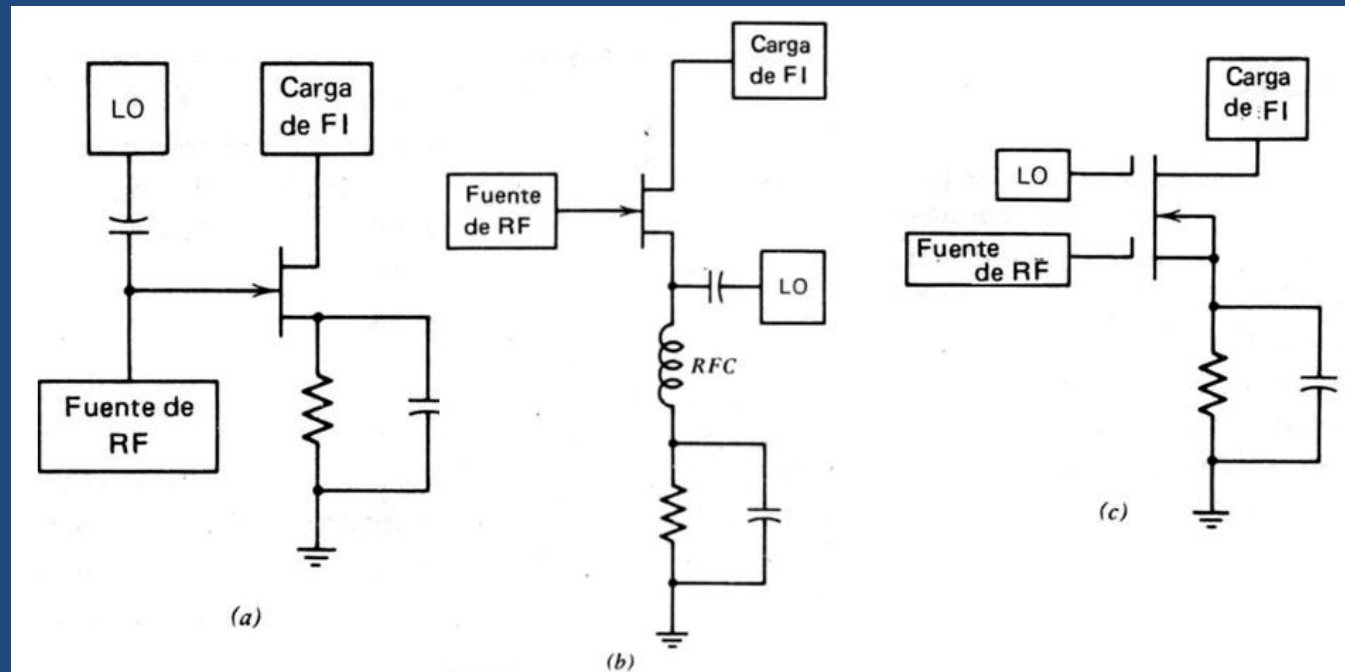


- Ejemplo: Medidor de intensidad de campo TES MC 661b

El campo de frecuencias de entrada tiene 4 bandas, 3 de VHF 40-65, 65-110, y 155-280 y una de UHF 470-840 MHz. Es un receptor heterodino con una cadena de IF con una banda pasante de 250 kHz a 400kHz y 70 dB de ganancia



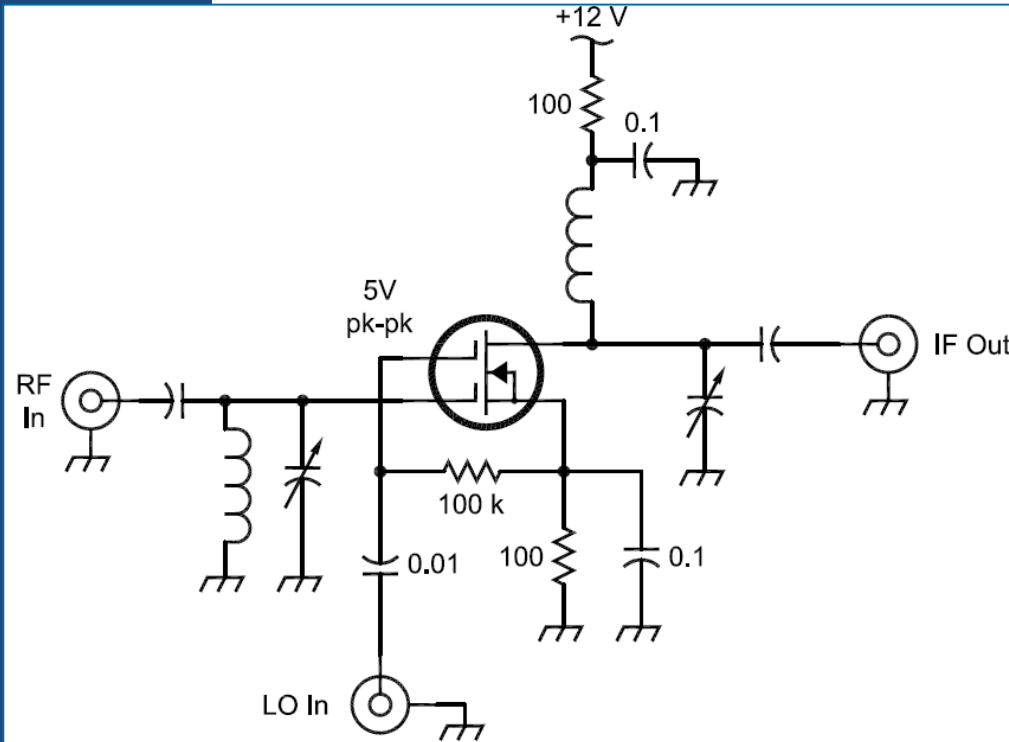
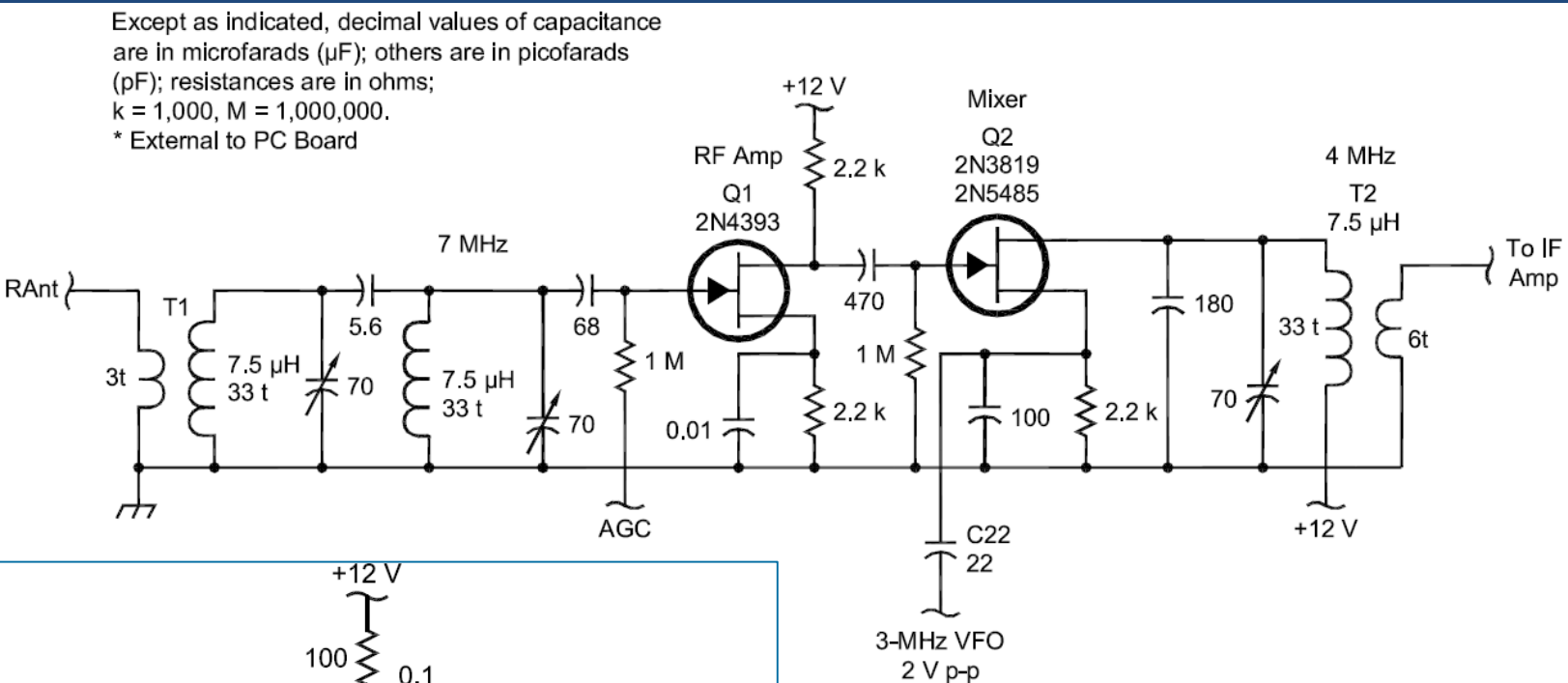
- Mezclador de terminación única a transistor
  - De los de terminación única son los preferidos
  - Especialmente a FET por su transferencia cuadrática
  - Se puede obtener una ganancia de conversión  $G_C = P_{IF}/P_{RF}$  mayor que uno y cierta aislación del OL por la unilateralidad de los dispositivos



(a) Mezclador a JFET con inyección de RF y LO en la puerta, (b) mezclador con JFET con inyección de LO en el surtidor, y (c) mezclador a MOSFET de doble compuerta con las señales de RF y LO inyectadas en las puertas



—Ejemplos

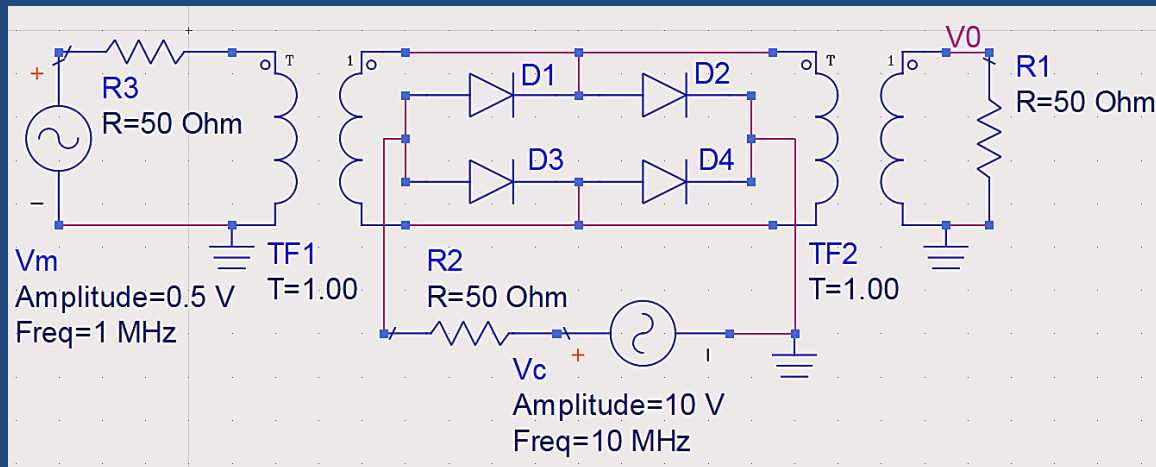


Circuito mezclador con JFET con inyección de LO por el surtidor. También se muestra el amplificador de RF controlado con AGC. Tomado de la revista QST Diciembre de 2000

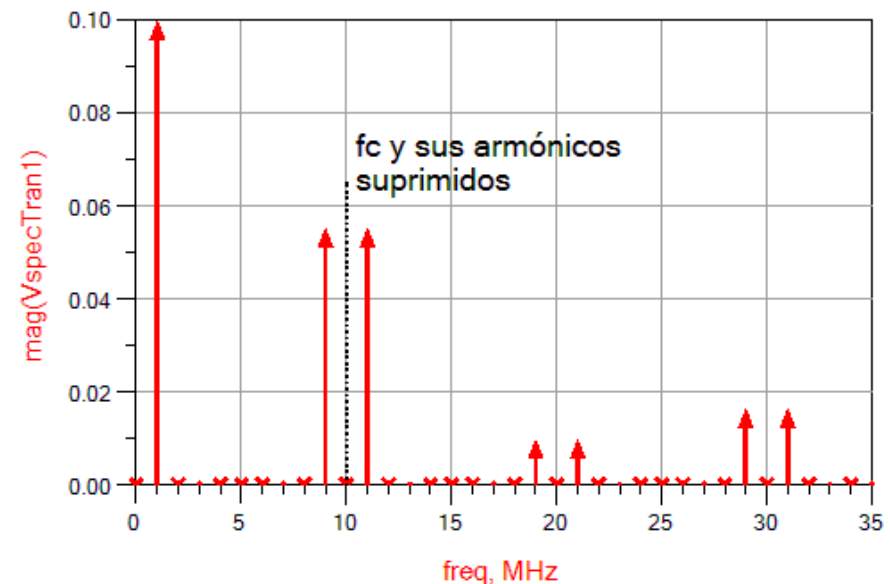
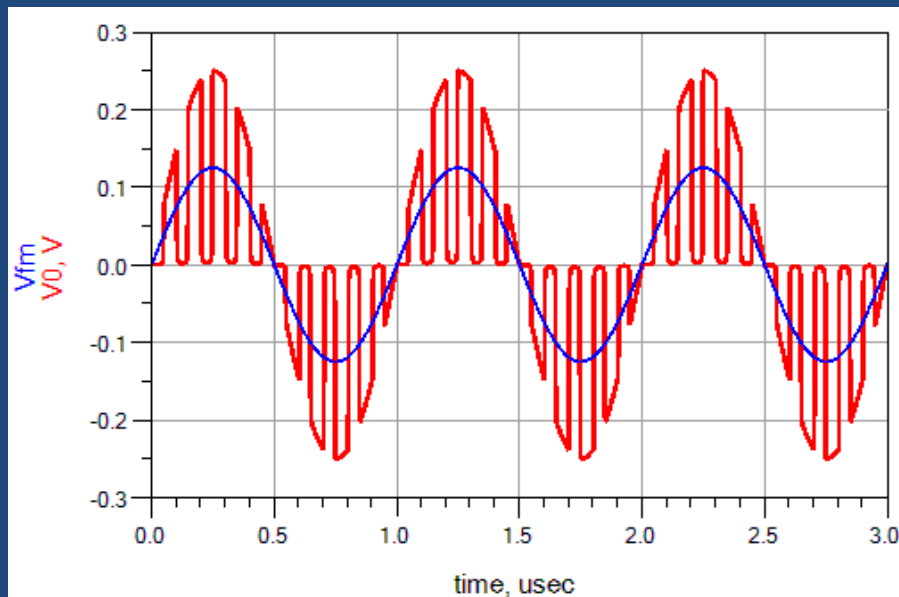
Circuito mezclador con MOSFET de doble compuerta

- Mezclador de balanceo simple

- Usa un número par de dispositivos alineales, diodos o FET
- Están dispuestos en forma equilibrada de tal forma que un terminal de entrada queda aislado de los otros

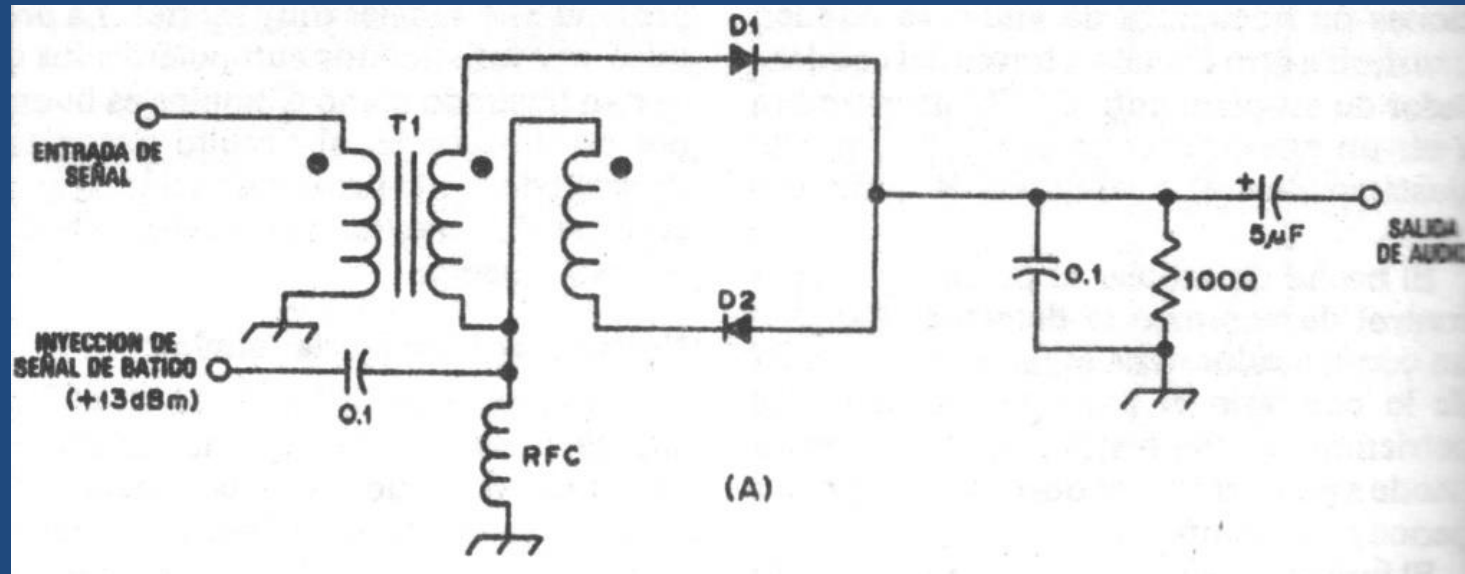


- Aislado significa que por sí solo no produce efectos en los otros
- Este circuito deja de funcionar bien cuando  $V_m$  aumenta impidiendo que  $V_c$  sature los diodos



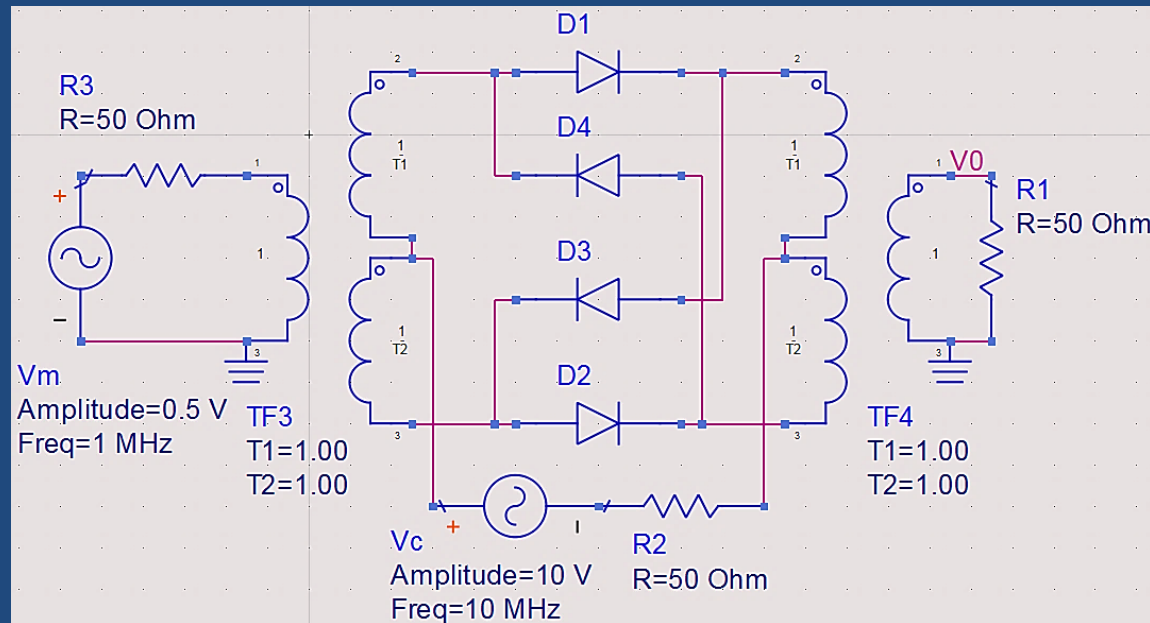


## — Ejemplo



- Mezclador de balanceo simple solo con dos diodos para ser aplicado en un detector de producto de BLU
- El terminal aislado es el de la entrada de la BLS (entrada de señal)
- El circuito incluye a la salida un poco comprometido filtro pasa bajo para eliminar la portadora reinsertada (señal de batido)

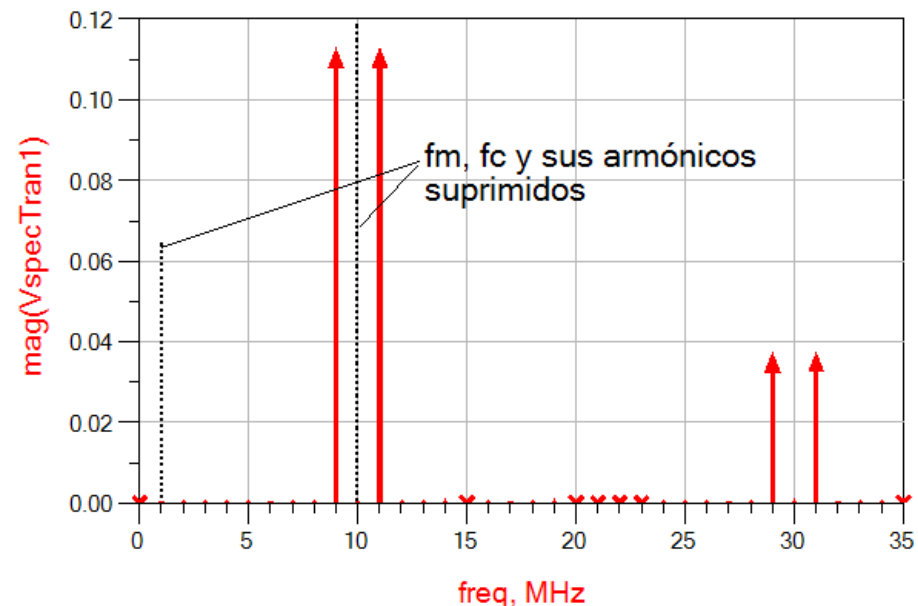
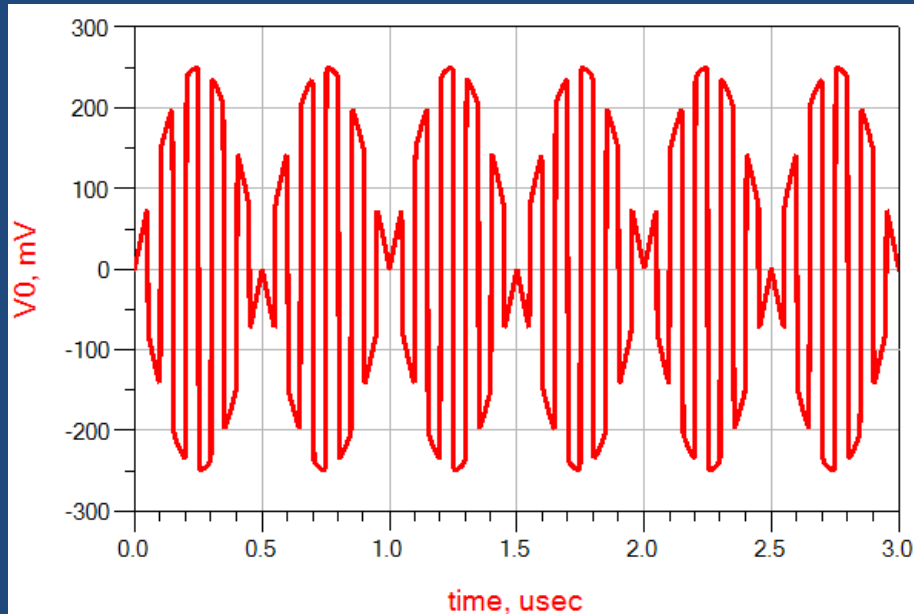
- Mezclador de balanceo doble



- Todos los terminales están aislados entre sí
- El circuito mostrado se aplicaría para generar una señal de AM con doble BL y portadora suprimida

- La señal  $V_c$  tiene una amplitud suficiente para hacer conducir plenamente los diodos polarizados directamente
- La corriente que circula por los trafos debido a  $V_c$  no tiene efecto en los terminales de  $V_m$  y  $V_0$  porque los amper vueltas de los semi devanados superiores se cancela con los amper vueltas de los devanados inferiores en cada transformador

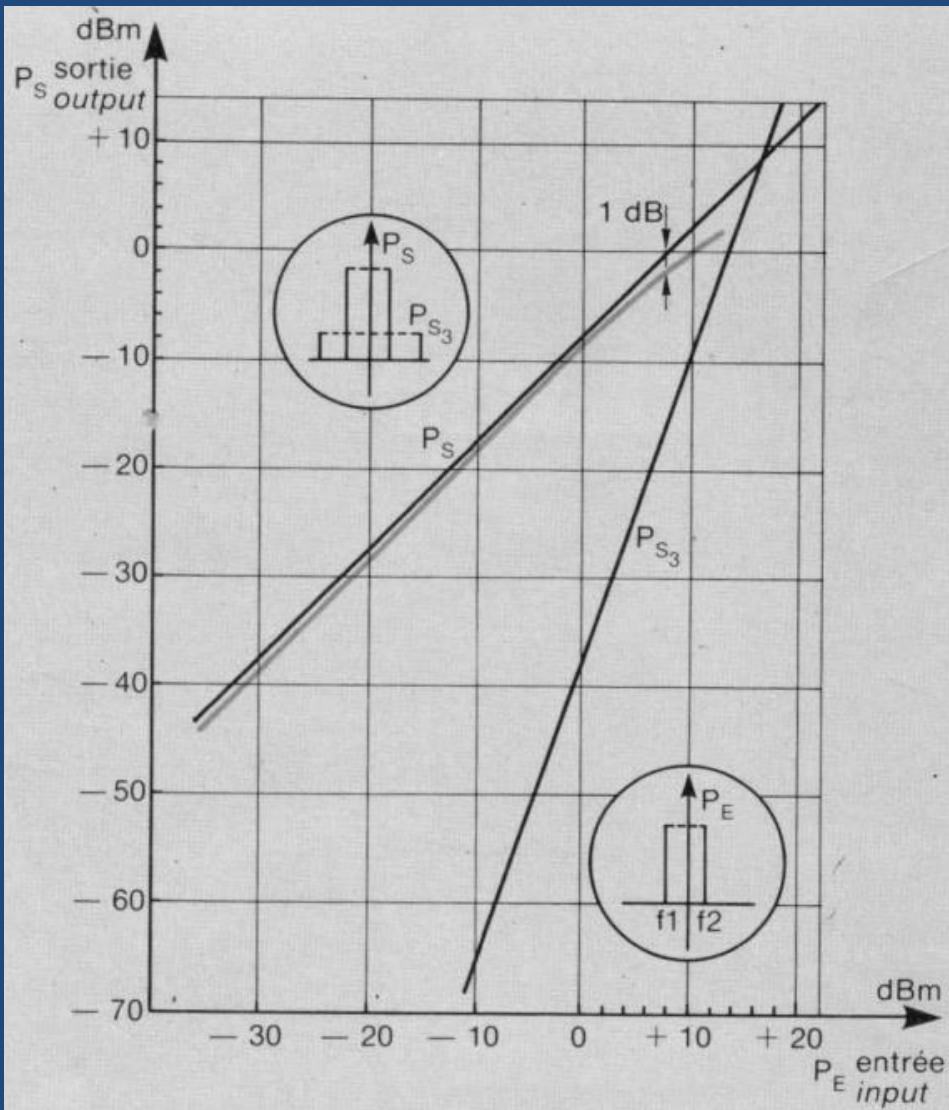
- Si  $V_c$  tiene la polaridad indicada en el circuito conducen D1 y D2, TF3 y TF4 quedan conectados en forma directa por la baja impedancia de los diodos
- Cuando la polaridad de  $V_c$  es opuesta conducen los internos D3 y D4 y TF3 y TF4 quedan conectados en forma invertida cambiando la polaridad de  $V_o$
- Se observa la supresión en la salida de  $V_m$  y  $V_c$  y de sus armónicos.
- No solo se suprimen los armónicos sino también algunos productos de mezcla no deseables.
- No se realizará acá un análisis más avanzado sobre el tema.



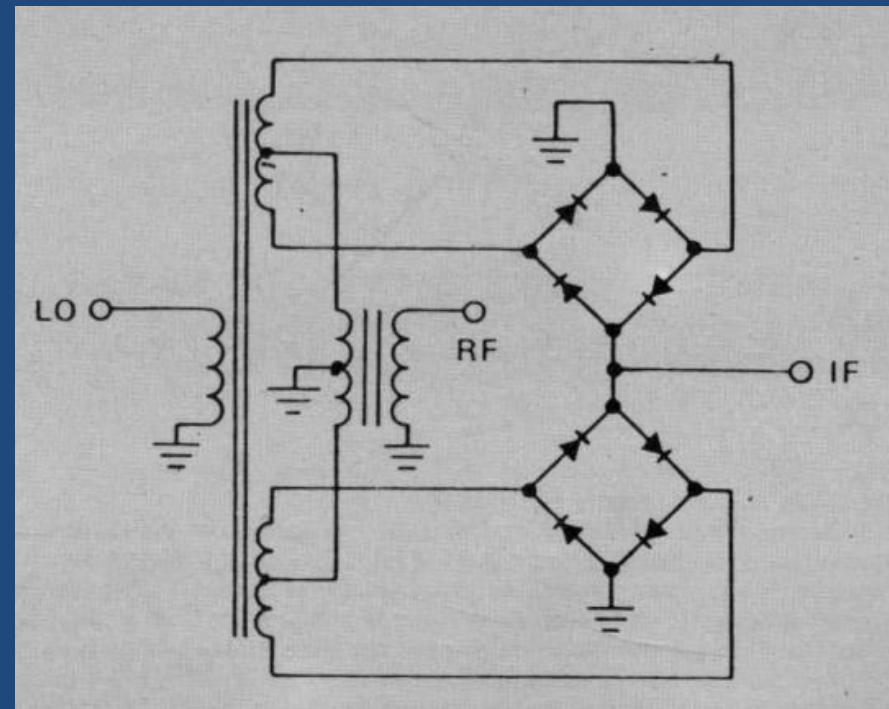
- Terminología de los mezcladores
  - Hoja de datos del mezclador doblemente balanceado TO4002-F56624 de Thomson-CSF (actualmente Thales)

<b>caractéristiques</b> <b>characteristics</b>					
paramètres parameters	conditions de mesures test conditions	min. min.	typ. typ.	max. max.	unités units
bande de fréquence RF - LO IF	$-55^{\circ}\text{C} \leq T \leq +100^{\circ}\text{C}$	10 1		3000 1000	MHz MHz
pertes de conversion conversion loss	<b>LO = + 10 dBm, RF = 0 dBm, IF = 150 MHz</b>  $10\text{ MHz} \leq f \leq 3000\text{ MHz}$ $T = +25^{\circ}\text{C}$ $-55^{\circ}\text{C} \leq T \leq +100^{\circ}\text{C}$		7 8	9	dB dB
découplage isolation	<b>LO = + 10 dBm, RF = 0 dBm</b>  $10\text{ MHz} \leq f \leq 3000\text{ MHz}$ $T = +25^{\circ}\text{C}$ $-55^{\circ}\text{C} \leq T \leq +100^{\circ}\text{C}$	20	25 23		dB dB
LO - RF					
découplage isolation	<b>LO = + 10 dBm</b>  $10\text{ MHz} \leq f \leq 3000\text{ MHz}$ $T = +25^{\circ}\text{C}$ $-55^{\circ}\text{C} \leq T \leq +100^{\circ}\text{C}$	20	25 23		dB dB
LO - IF					
découplage isolation	<b>LO = + 10 dBm</b>  $10\text{ MHz} \leq f \leq 3000\text{ MHz}$ $T = +25^{\circ}\text{C}$ $-55^{\circ}\text{C} \leq T \leq +100^{\circ}\text{C}$	18	20		dB dB
RF - IF					
entrée RF RF input					
1 dB compression 1 dB compression	$T = +25^{\circ}\text{C}$		+ 7		dBm
1 dB désensibilisation 1 dB desensitization	$T = +25^{\circ}\text{C}$		+ 3		dBm
point d'intersection du 3 <sup>e</sup> ordre 3rd order intercept point	<b>LO : 1500 MHz, + 10 dBm</b> <b>RF1 : 1680 MHz, RF2 : 1700 MHz</b> $T = +25^{\circ}\text{C}$		+ 8		dBm

– Diagrama del punto de intercepción por el método de la señal bitonal del mismo mezclador

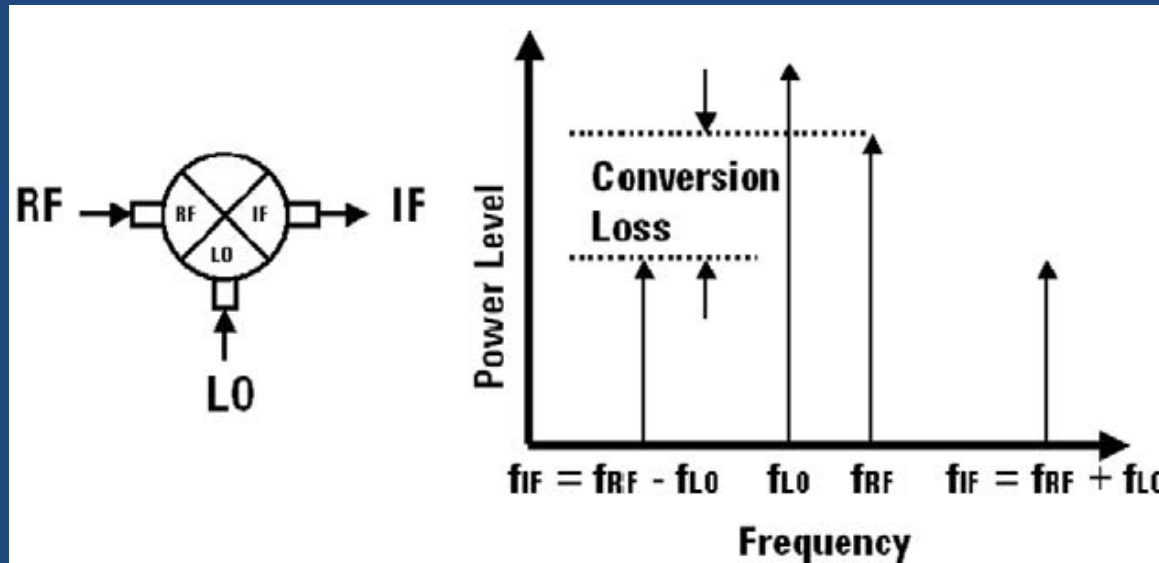


– La potencia del LO es de 10 dBm





- Pérdida de conversión



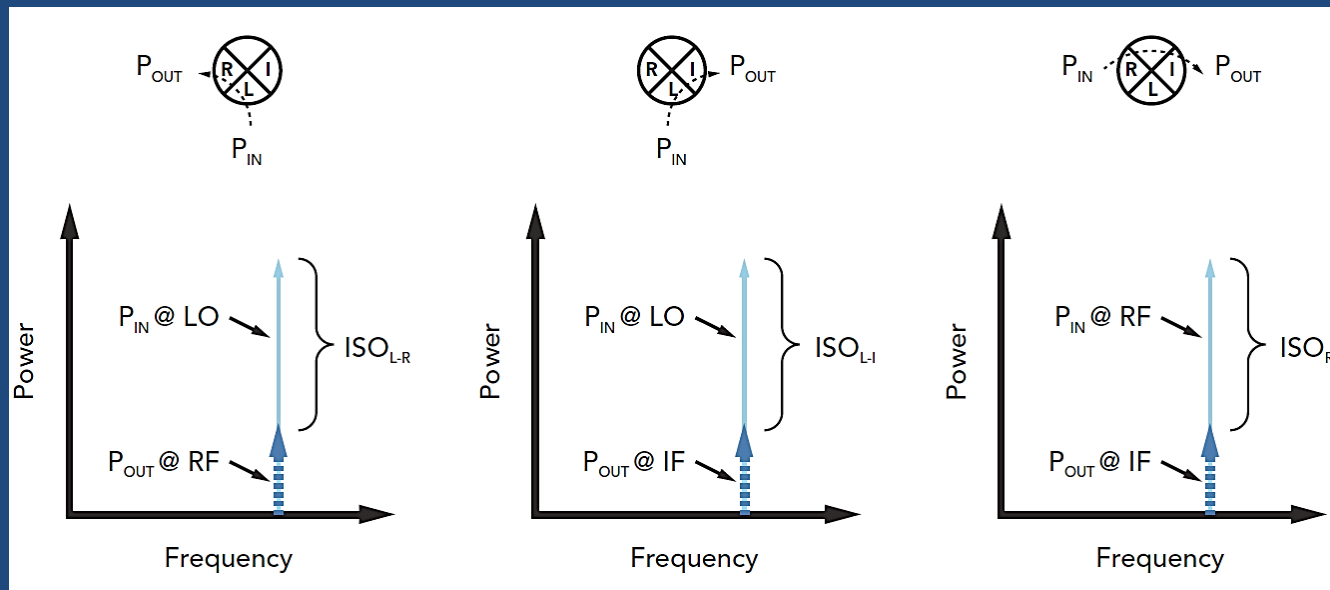
- Es el parámetro más importante de un mezclador
- Se define como la diferencia entre la potencia de RF de entrada y la potencia de IF de salida  $CL = P_{RF} - P_{IF}$

- Normalmente sólo se desea uno solo de los productos de mezcla, el otro producto se filtra
- Por lo tanto un mezclador ya tiene de salida una pérdida de conversión de 3 dB
- Hay pérdidas adicionales tales como los productos de mezcla de orden superior, pérdidas por disipación en la resistencia serie de los diodos, desequilibrios del mezclador, etc.
- Las pérdidas de conversión típicas en los dispositivos van de los 6 a los 9 dB

- Aislaciones

- Es una medida de la potencia que se fuga de un puerto a otro sin mecanismo de conversión
- La aislación se obtiene por balanceo del mezclador (incluye el apareamiento de elementos lineales, diodos o transistores) o por el uso de elementos unilaterales
- La aislación es la diferencia de potencia entre la entrada de señal en un puerto y la potencia de la misma frecuencia fugada a otro puerto, por ejemplo
  - $ISO_{(LO-RF)} = P_{in(@LO)} - P_{out(@RF)}$
- Las aislaciones tienen un comportamiento aproximadamente simétrico
  - la aislación entre el puerto 1 y el puerto 2 es similar a la aislación entre el puerto 2 y el puerto 1
- Los valores de aislamiento LO-RF típicos varían entre 25 a 35 dB
- Si hay un aislamiento pobre entre el LO y el terminal de RF, la potencia del LO puede contaminar la línea de RF interfiriendo con el amplificador de RF

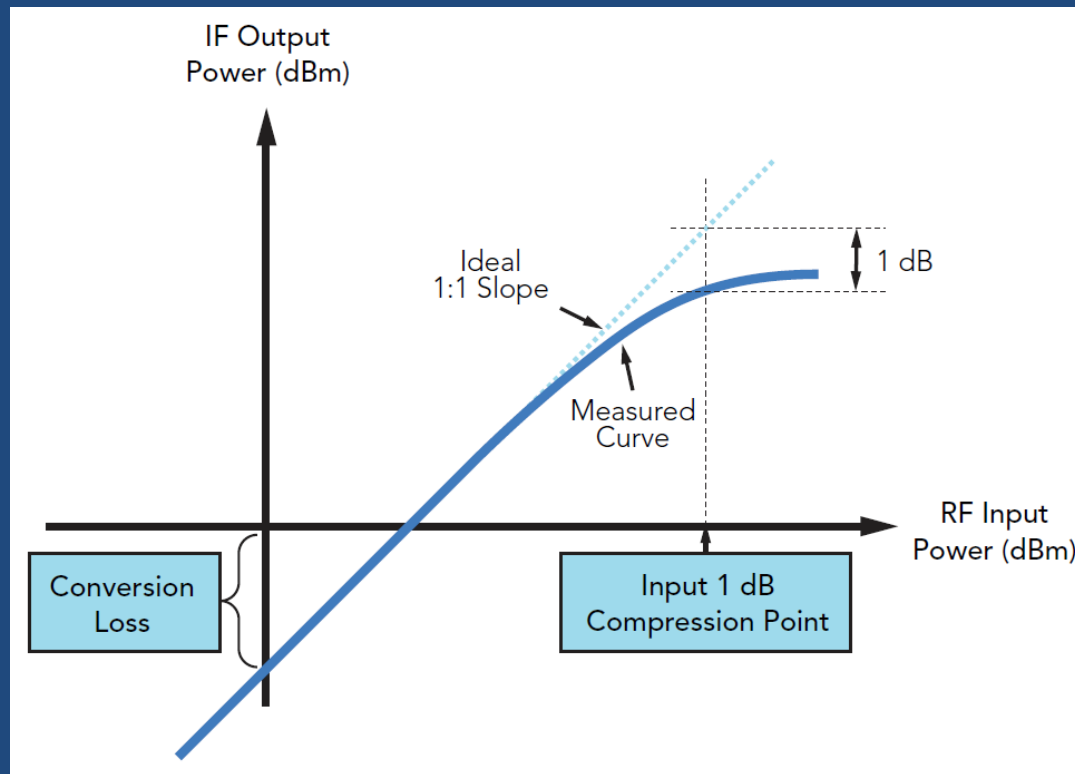
- Si la entrada de RF estuviera directamente conectada a la antena el receptor podría radiar la señal del LO
- La aislación LO-IF tiende a ser la peor de los tres tipos de aislamiento del mezclador con valores típicos que van desde 20 hasta 30 dB
- Si la  $f$  del OL está cerca de la IF puede saturar el amplificador de IF
- Los valores típicos de aislamiento RF-IF varía entre 25-35 dB
- Normalmente un pobre aislamiento RF-IF no es un problema importante ya que las potencias de las señales de RF y de FI son algunos órdenes de magnitud menor que la potencia del LO



- Sin embargo un buen aislamiento RF-IF es un indicador de un mezclador bien balanceado, con baja pérdida de conversión y respuesta en frecuencia plana



- 1 dB de compresión



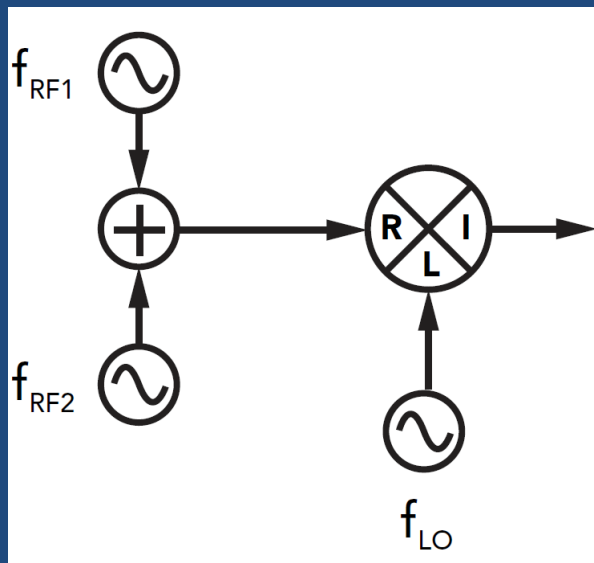
- En condiciones normales la pérdida del mezclador es constante
  - La conmutación de los diodos está dominada por el LO
  - Pero si  $P_{RF}$  es muy grande la regla no se cumple ya que compromete la conmutación de los diodos
  - El punto de 1 dB de compresión es una medida de la linealidad de un mezclador
- 
- Como regla práctica el punto de compresión de 1 dB esta de 4 a 7 dB debajo del mínimo nivel de potencia de LO recomendada para el mezclador
  - Algunos puristas expresan que un receptor no puede ser mejor para niveles de baja señal en antena que su amplificador de RF ni mejor que su primer mezclador para altos niveles de señal

- Figura de ruido
  - Salvo casos excepcionales de diodos muy ruidosos, la figura de ruido de un mezclador es aproximadamente igual que la pérdida de conversión
  - Cuando se eligen mezcladores para aplicaciones de pequeña señal, como el caso de un receptor sin amplificador de RF, es conveniente seleccionar un mezclador con una pérdida de conversión tan baja como sea posible

- Rango dinámico

- El rango dinámico se mide en dB y es el rango de potencia RF de entrada en que el mezclador es útil
- El límite inferior del rango dinámico es el piso de ruido equivalente a la entrada, que depende del mezclador y del ancho de banda del sistema
- El límite superior del rango dinámico se toma generalmente como el punto de compresión de 1 dB
- Dicho con otras palabras es el rango de la potencia de entrada de RF que va desde que la señal de IF asoma sobre el ruido hasta que la pérdida de conversión aumenta 1 dB
- Un mezclador excitado con mayor potencia de LO tiene un mayor rango dinámico, pero a expensas de un mayor consumo de potencia.

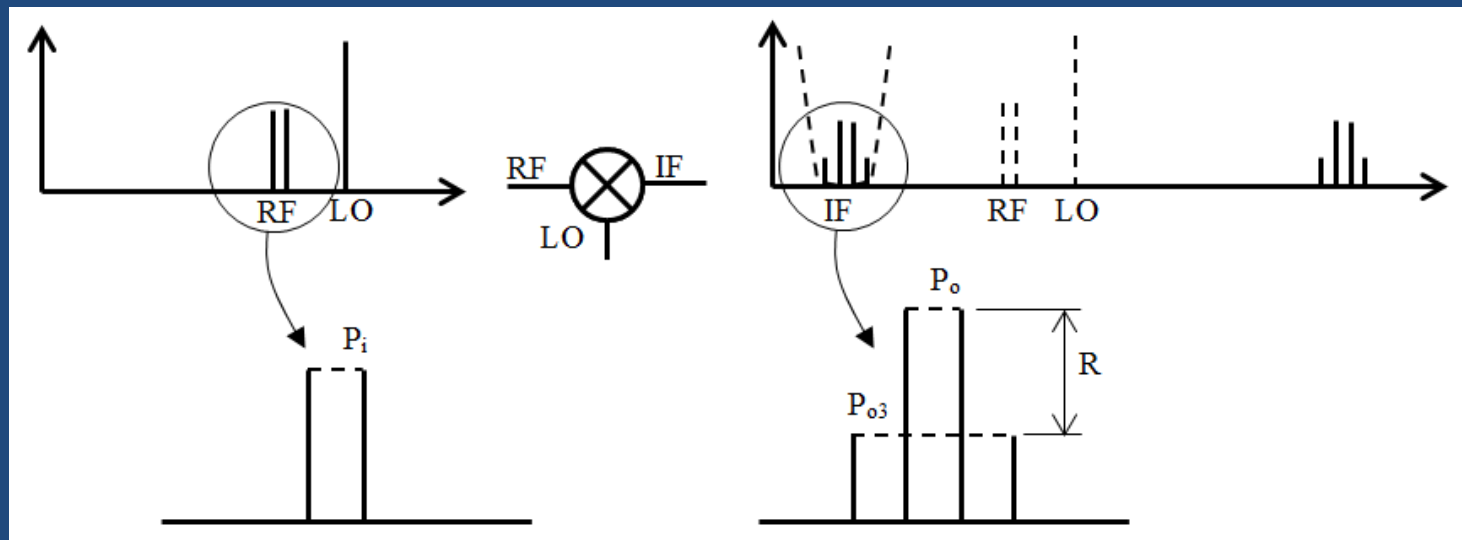
- Punto de intercepción de 3er orden por el método de la señal bitonal
  - Próximo a niveles de RF que producen una compresión de 1 dB en la pérdida de conversión, comienzan a aparecer productos de intermodulación que pueden oscurecer la señal de IF, haciendo que la misma pierda calidad



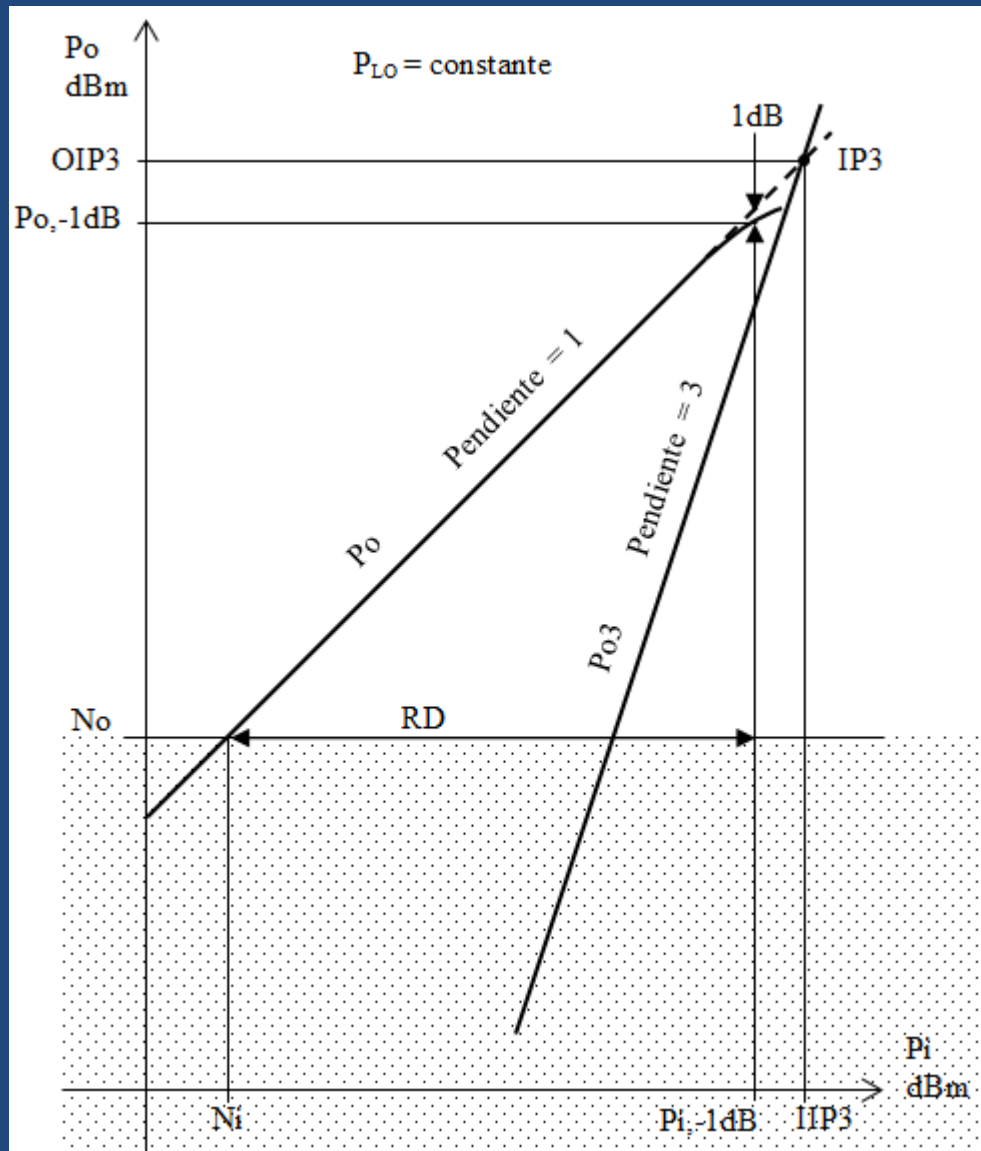
Esquema de medición del IP3

- Los productos de intermodulación más perjudiciales son aquellos que caen en el ancho de banda del filtro de IF, ya que no pueden ser eliminados fácilmente
- Una señal simple de generar para evaluar los mezcladores es la señal bitonal
- En la figura se muestra el circuito de ensayo

- Espectrogramas que muestran los productos de intermodulación de 3<sup>er</sup> orden
- Por simplicidad solo se han incluido los términos de 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> orden significativos para el análisis



- $P_i$ ,  $P_o$  y  $P_{o3}$  tienen correlato con lo indicado en la [Fig](#)
- $R$  es el rechazo de los productos de intermodulación
- La  $P_o$  está dada por  $P_o = P_i - CL$



- Gráfico del punto de intercepción de 3<sup>er</sup> orden por el método de la señal bitonal
- Se indican  $RD$  rango dinámico,  $OIP_3$  es la potencia de salida y  $IIP_3$  la potencia de entrada de el punto de intercepción
- $P_{o,-1dB}$  y  $P_{i,-1dB}$  son respectivamente la potencia de entrada y de salida para 1 dB de compresión de la ganancia de conversión
- Note que el punto en cuestión no está sobre la recta de pendiente unitaria sino sobre la curva 1 dB más abajo
- Se puede demostrar que

$$OIP_3 = P_o + \frac{R}{2}$$

## • Ejemplo 1

- Sea el mezclador doblemente balanceado TO4002-F56624 de Thomson-CSF cuyas hojas de datos se muestran en la [Fig](#)
- El mismo se va a aplicar en un receptor cuya IF tiene un ancho de banda de 200 kHz
- Calcule el ruido de fondo equivalente de entrada  $N_i$ , el rango dinámico  $RD$ , y el rechazo  $R$  estimado de los productos de intermodulación de 3er orden si la potencia de entrada vale 0 dBm (verifique el resultado con la [Fig](#))
- Solución:
  - Sabiendo que la figura de ruido  $F \approx CL = 7$  dB la potencia, el ruido disponible de fondo es  $N_i = (kT)\text{dBm} + F + 10\log(B) \approx -174 \text{ dBm} + 7 + 10\log(200\text{e}3) = -114 \text{ dBm}$
  - Entonces el  $RD = P_{i,-1\text{dB}} - N_i = 7 - (-114) = 121\text{dB}$
  - $R = (OIP3 - P_o) * 2 = [8 - (0 - 7)] * 2 = 30 \text{ dB}$  que se corrobora con la figura

# Ejemplo 2

- Con AWR dado el siguiente circuito graficar el punto de intercepción por el método de la señal bitonal\*

