

# Sistemas de Radiofrecuencia

## Tema 4. Mezcladores de frecuencia



**Almudena Suárez Rodríguez**  
**Franco Ramírez Terán**  
**Mabel Pontón Lobete**

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



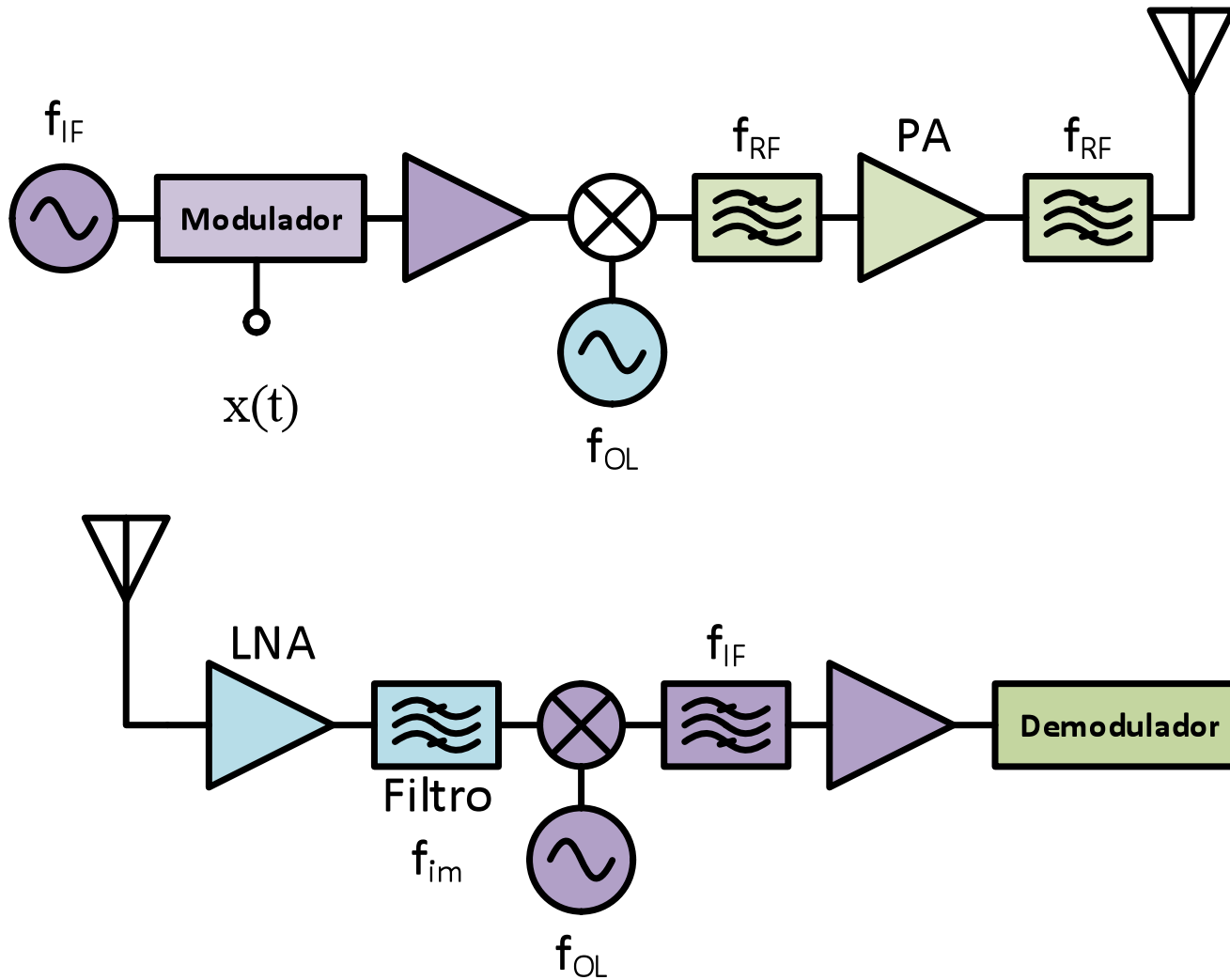
# Índice

- Introducción.
- Principales características.
- Tipos de mezcladores.

# Introducción

- Diagrama bloques transmisor receptor.
- Concepto conversión de frecuencia.
- Frecuencia imagen.

### Introducción



# Características

- Ganancia de conversión.
- Aislamiento.
- Linealidad:
  - P1dB.
  - IP3.
- Factor de ruido.
- Rango dinámico.

## Ganancia de conversión

La ganancia (o pérdida) de conversión se define como:

$$g_C = \frac{\text{potencia de señal deseada a la salida}}{\text{potencia de la señal de entrada}}$$

### Down-converter

$$g_C = \frac{\text{potencia IF}}{\text{potencia RF}}$$

$$G_{C,d} (\text{dB}) = P_{IF} (\text{dBm}) - P_{RF} (\text{dBm})$$

### Up-converter

$$g_C = \frac{\text{potencia RF}}{\text{potencia IF}}$$

$$G_{C,u} (\text{dB}) = P_{RF} (\text{dBm}) - P_{IF} (\text{dBm})$$

## Ganancia de conversión

$$g_c = \frac{\text{potencia de señal deseada a la salida}}{\text{potencia de la señal de entrada}}$$

- La potencia de OL no influye en el cálculo de  $g_c$ .
- Los mezcladores activos presentan ganancia de conversión positiva.
- Valores típicos de ganancia de conversión: de  $-6$  a  $-9$  dB.
- ❖ Las pérdidas incluyen la desadaptación entre generador y entrada, resistencia serie (mezcladores a diodo), términos de intermodulación orden superior, etc.

## Aislamiento

Parámetro que mide el acoplamiento ('leakeage') entre puertos del mezclador.

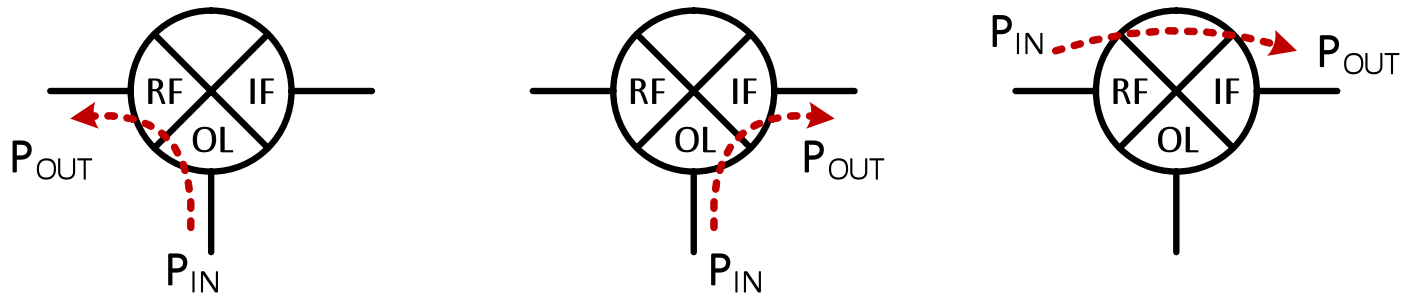
El acoplamiento de la señal del oscilador local es particularmente importante: la de mayor amplitud de las tres.

Se define el aislamiento como la diferencia de potencia entre la señal a la entrada de un puerto y la potencia a la misma frecuencia en otros, como resultado del acoplamiento.

$$P_{ISO} = P_{IN} - P_{OUT}$$



## Aislamiento



L-R: Aislamiento entre el puerto OL y RF.

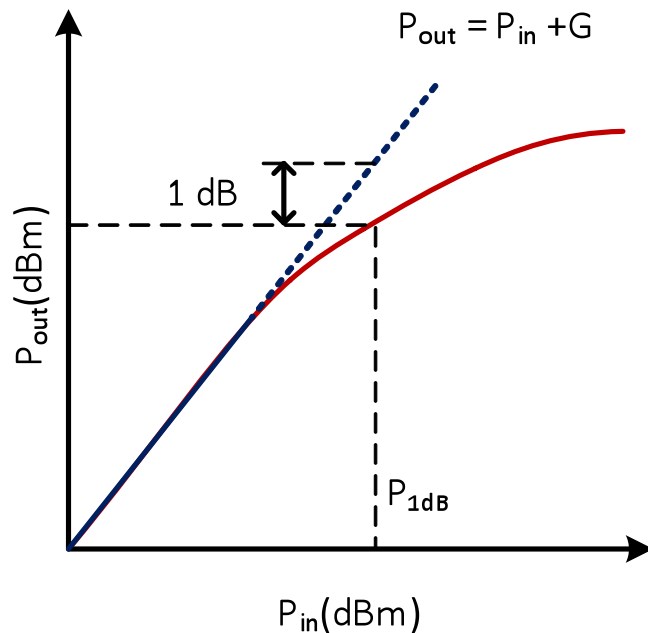
L-I: Aislamiento entre el puerto OL e IF.

R-I: Aislamiento entre el puerto RF e RF.

## Punto de compresión de 1 dB

El punto en el que la salida deja de seguir linealmente a la entrada y se desvía en 1 dB.

Se observa a medida que la potencia de la señal de RF se incrementa.

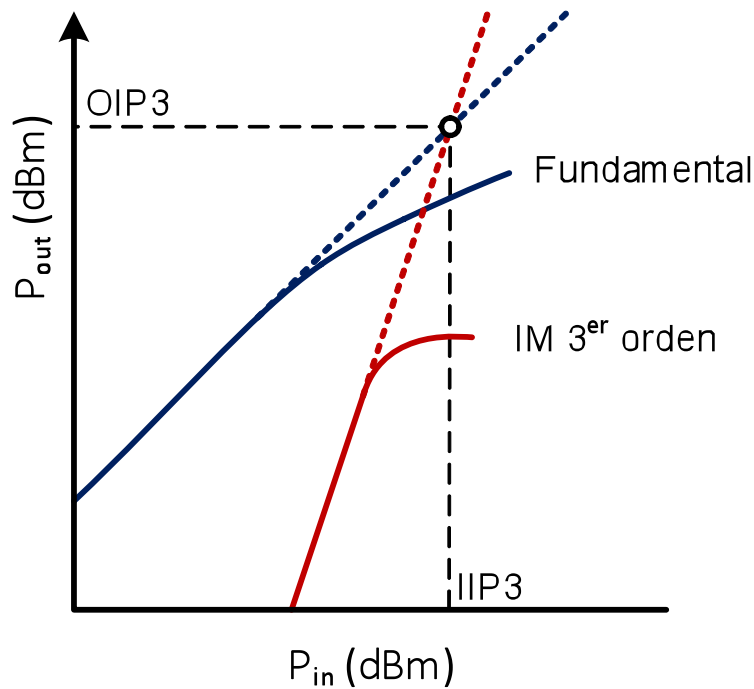


- En régimen lineal, la señal de OL es mayor y domina.
- En compresión ambas señales (OL y RF) 'compiten' y el funcionamiento del mezclador se ve comprometido.

## Punto de intercepción de tercer orden

El punto en el que los productos de tercer orden igualan a la señal de salida deseada.

Es un punto ficticio dado que en la práctica el dispositivo saturará antes.

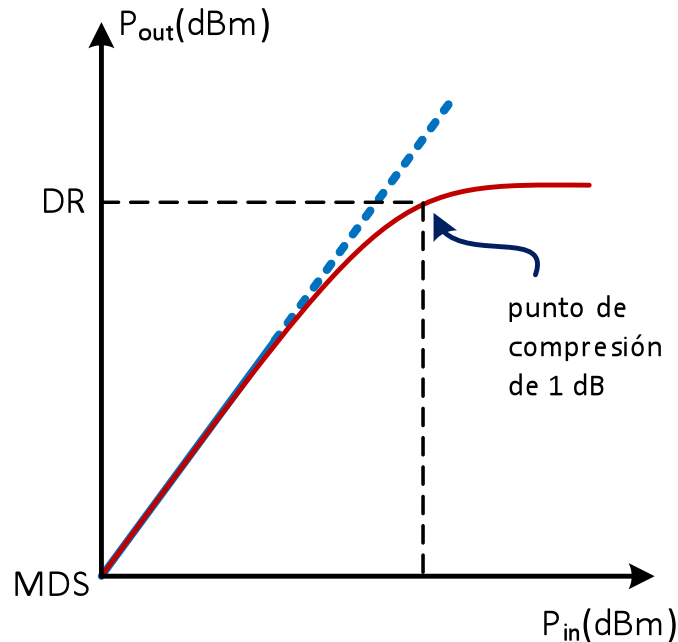


- Análisis de dos tonos espaciados  $\Delta f$  en frecuencia.
- Un valor alto de IIP3 garantiza un valor alto de DR y de  $P_{1dB}$ .

## Rango dinámico

Márgen de niveles de potencia de entrada para los cuales la potencia de salida es ***proporcional linealmente*** a dicha potencia de entrada.

La constante de proporcionalidad es la ganancia (pérdida de conversión).



- El límite inferior corresponde a la mínima señal detectable (MDS).
- El límite superior viene dado por el punto de compresión de 1 dB.

## Factor de ruido, F

En un mezclador está generalmente definido para un sistema de banda lateral simple:

$$F_{SSB} (dB) = G_C (dB) + 10 \log_{10} \left( \frac{\text{potencia de ruido a IF}}{\text{potencia de ruido a RF}} \right)$$

Definición para simple banda (se rechaza la banda imagen).

$$F_{DSB} (dB) = F_{SSB} (dB) - 3dB$$

Definición para doble banda (se contempla la banda imagen).

## Tipos de circuitos mezcladores

### Mezcladores pasivos – Diodos:

- Diodo Schottky:
    - Velocidad de conmutación alta.
    - Frecuencia máxima de operación mayor.
    - Tensión umbral menor a los diodos PN.
- 

### Mezcladores activos:

- Transistor bipolar.
- FET:
  - Frecuencia máxima menor al diodo.
- HBTs, HEMT, etc.

## Tipos de circuitos mezcladores

### Mezcladores pasivos:

- Pérdidas de conversión.
  - Alta tolerancia a los productos de intermodulación.
  - Requieren transformadores/baluns externos.
- 

### Mezcladores activos:

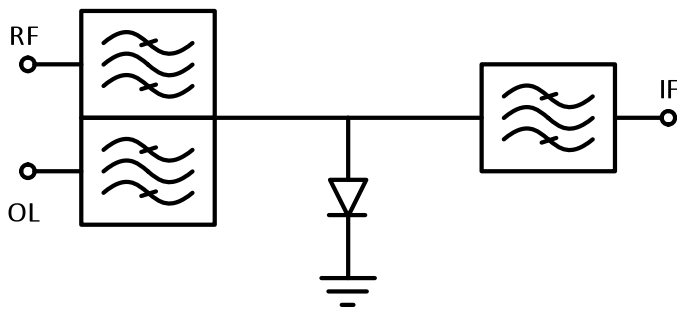
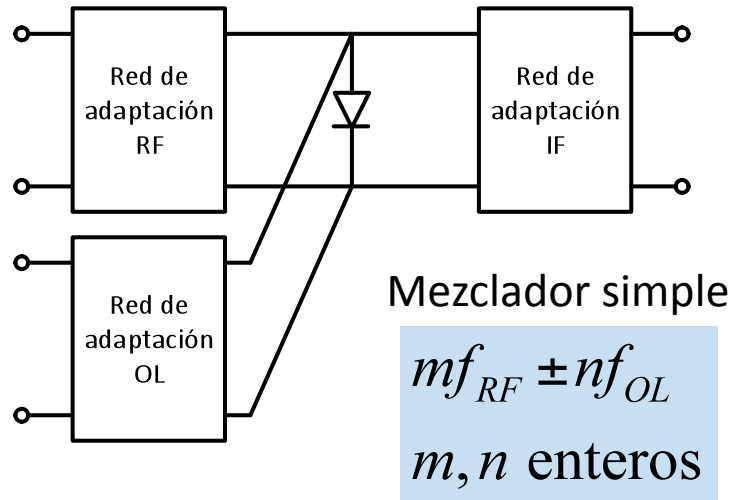
- Pueden proporcionar ganancia.
- Balunes activos – adecuados para integración IC.
- Peor comportamiento de intermodulación.

## **Tipos de circuitos mezcladores**

- Simple.
- Balanceado.
- Doblemente balanceado.
- Triplemente-balanceado.



## Mezclador simple



El mezclador más simple. Utiliza un diodo Schottky.

Se utiliza un diplexor para combinar las señales de RF y OL:

- Aislamiento bajo entre RF y OL.
- No existe supresión de espurios.

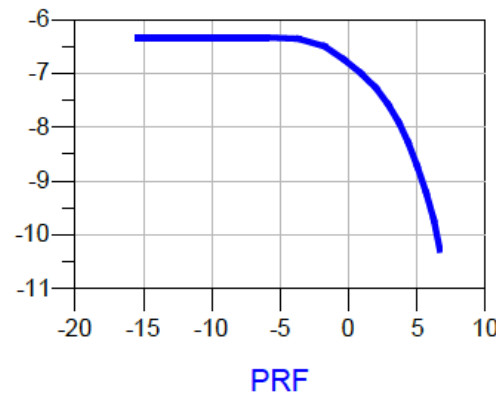
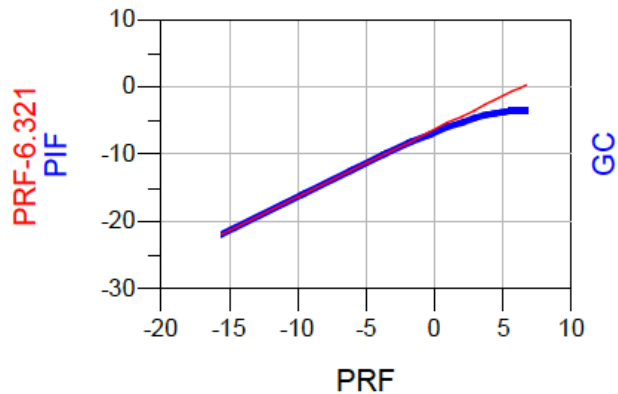
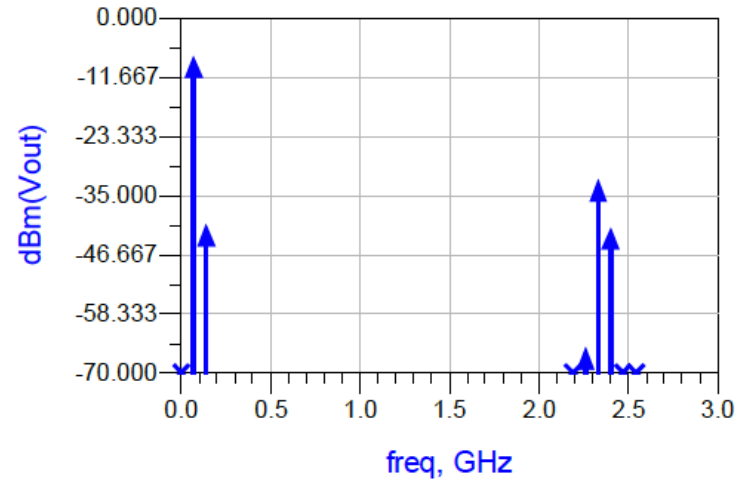
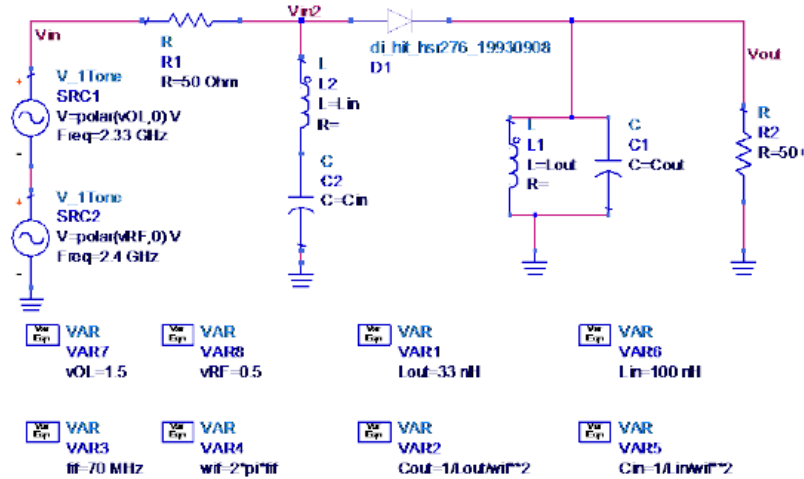
No presenta ganancia de conversión.

A pesar de sus limitaciones es útil a frecuencias muy altas donde otras técnicas no son totalmente aplicables.

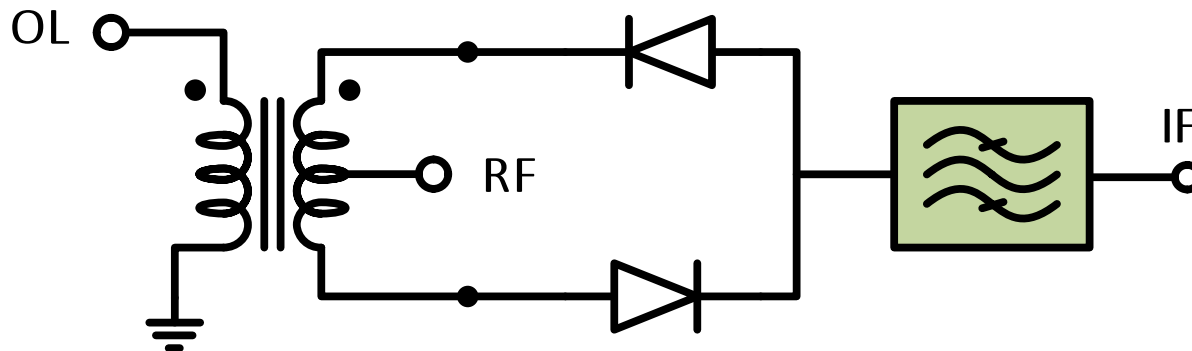
### Ejemplo mezclador simple

**HARMONIC BALANCE**

HarmonicBalance  
HB1  
Freq[1]=2.33 GHz  
Freq[2]=2.4 GHz  
Order[1]=5  
Order[2]=5



## Mezclador balanceado

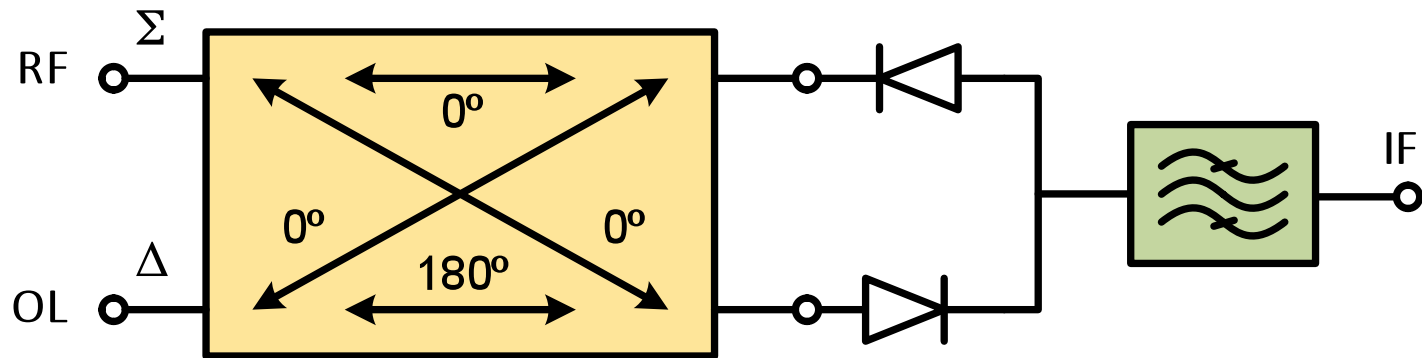


Se cancelan determinados productos de intermodulación OL – RF.  
Se reducen los productos de intermodulación en un 50%.

### Características:

- El aislamiento OL – RF mejora, pero depende de la adaptación de impedancia de los diodos.
- Se suprimen (rechazan) los armónicos pares de la señal OL.
- Rechazo del ruido AM del oscilador local.

## Mezclador balanceado



Mezclador balanceado con híbrido de 180°.

### Características (cont.):

- Se requiere mayor potencia de OL.
- Se suprimen los armónicos pares de la señal balanceada.
- Las señales OL y RF se conectan en un par de puertos mutuamente aislados (ISO).
- Los diodos se conectan con polaridades opuestas.

# Mezclador balanceado

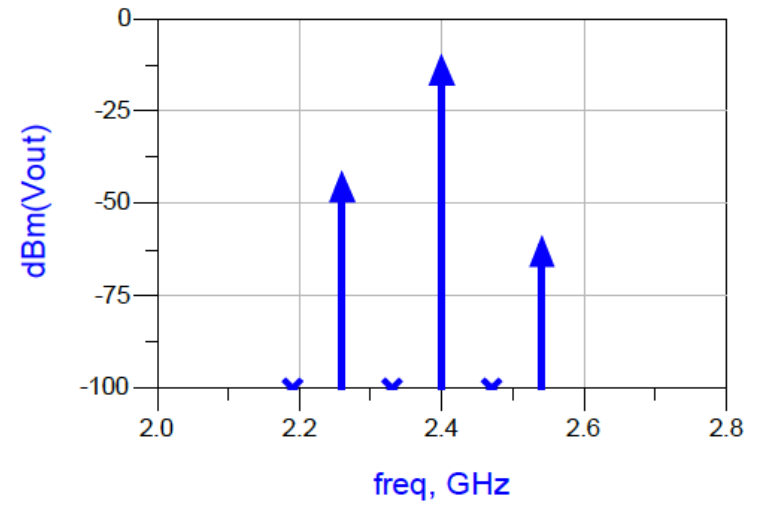
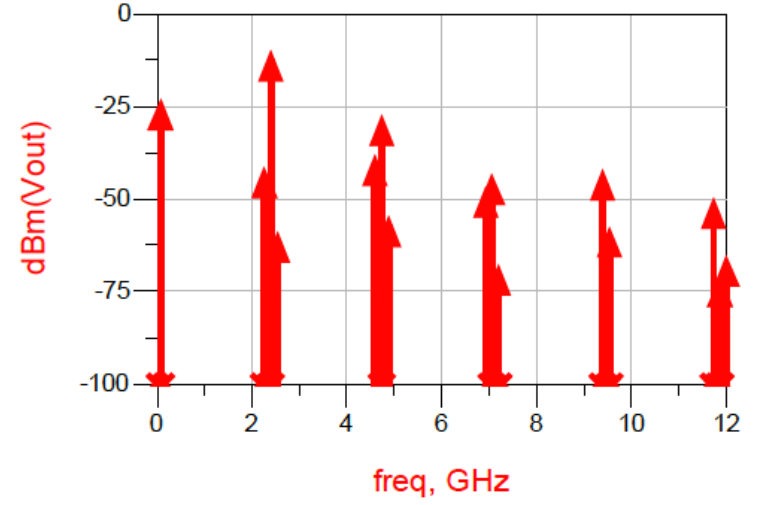
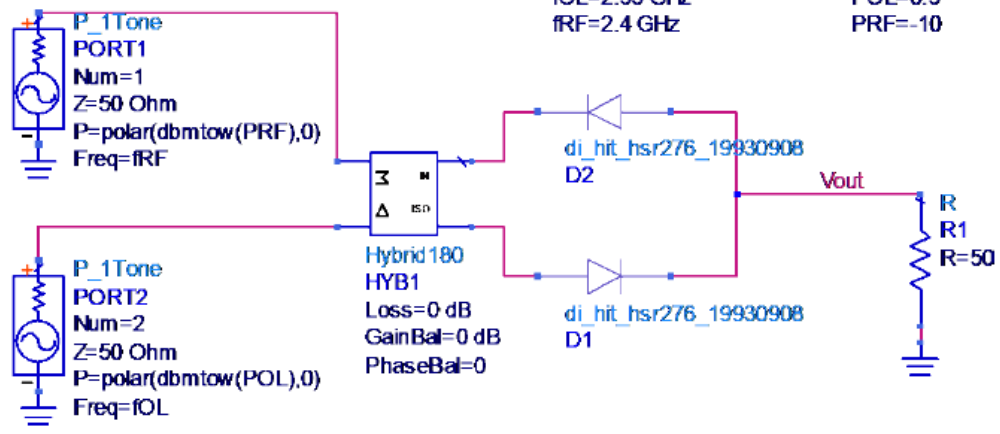
## Ejemplo de diseño (I)

**HARMONIC BALANCE**

HarmonicBalance  
 HB1  
 Freq[1]=fOL  
 Freq[2]=fRF  
 Order[1]=5  
 Order[2]=-5

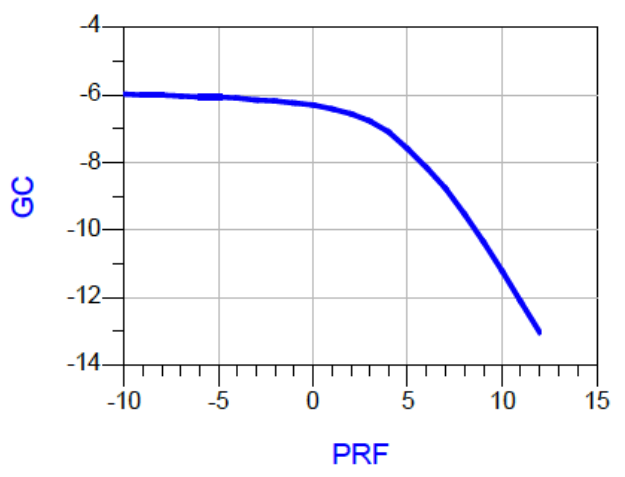
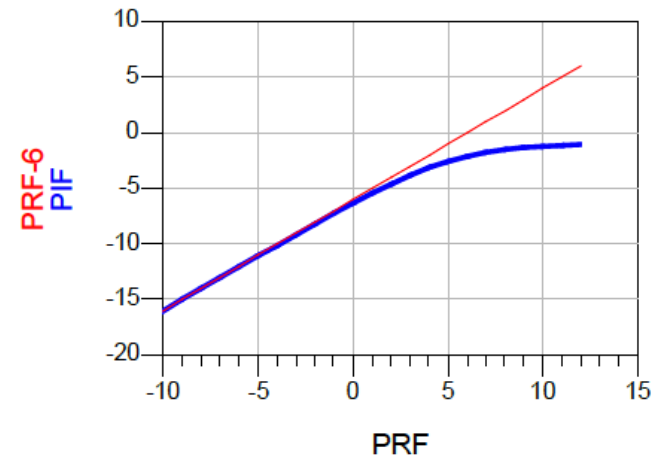
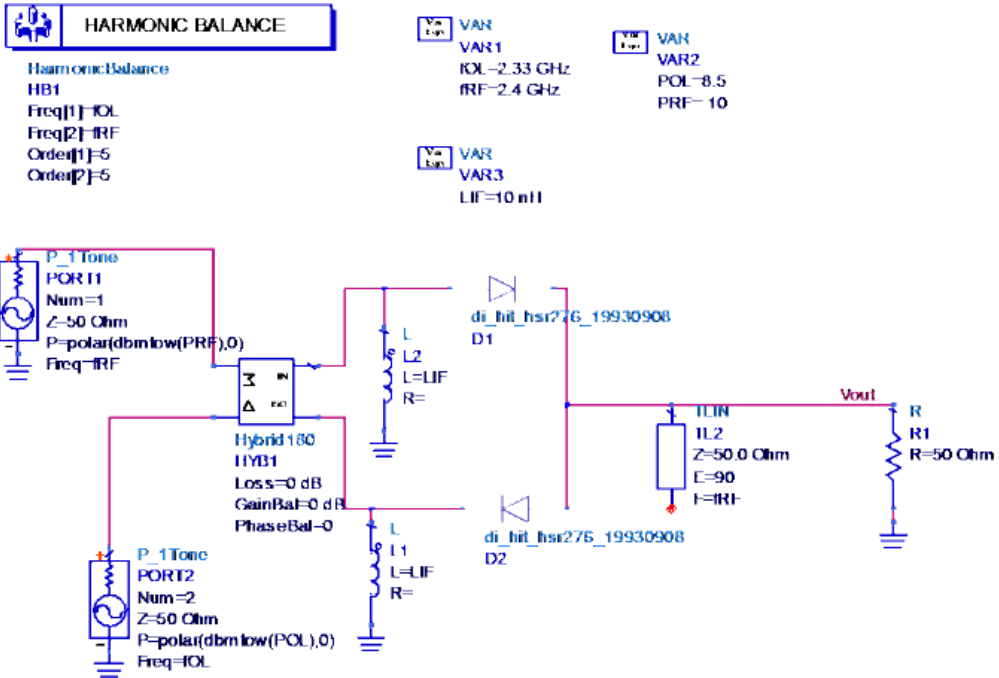
VAR  
 VAR1  
 fOL=2.33 GHz  
 fRF=2.4 GHz

VAR  
 VAR2  
 POL=8.5  
 PRF=-10



# Mezclador balanceado

## Ejemplo de diseño (II)

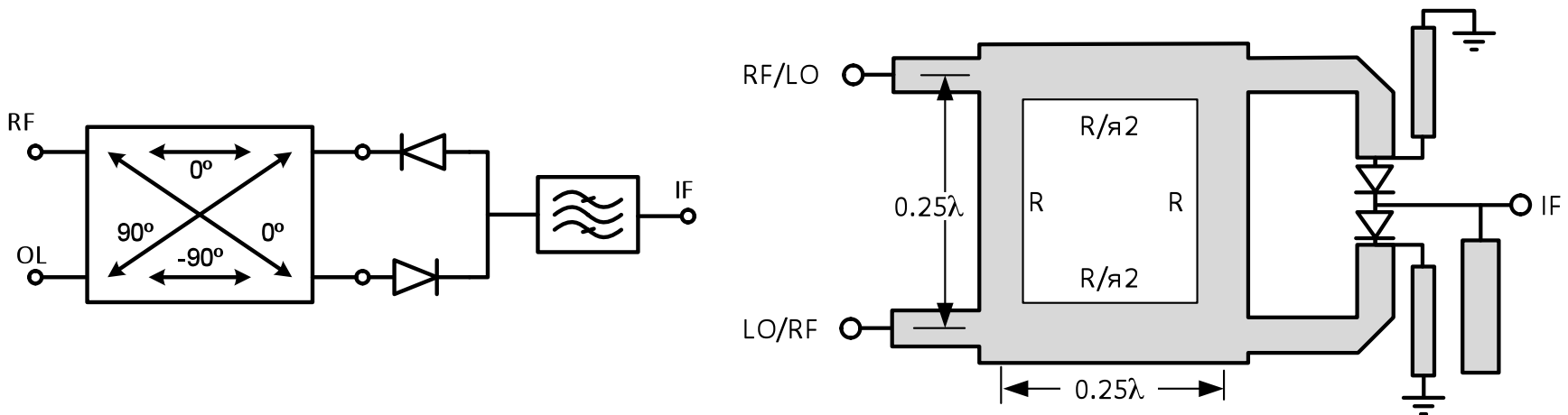


Las bobinas se implementan para conseguir el llamado 'retorno de IF' y proporcionan un camino de dc a los diodos.

La línea a la salida, es un corto circuito a RF: minimiza las pérdidas de conversión.

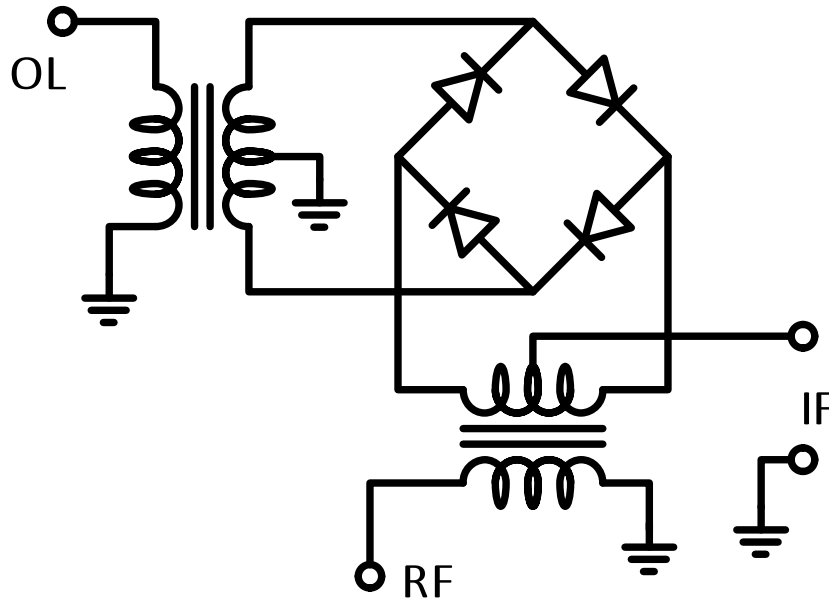
## Mezclador balanceado

Mezclador balanceado con híbrido de  $90^\circ$ .



- Peor aislamiento RF-OL (10 dB típico) comparado con el híbrido de  $180^\circ$ .
- Los anchos de banda de RF y OL pueden ser distintos.
- No se rechazan productos de orden (2, 1) y (1, 2).
- La adaptación en los puertos RF y OL es mucho más crítica.

## Mezclador doblemente balanceado



Utiliza cuatro diodos en configuración anillo (estrella).

Las señales de OL y RF están balanceadas y aisladas entre ellas.

### Ventajas:

- Aislamiento entre todos los puertos.
- Mejora la linealidad.
- Mejora la supresión de espurios.

### Desventajas:

- Cuatro diodos y dos híbridos.
- Requiere más potencia de OL.

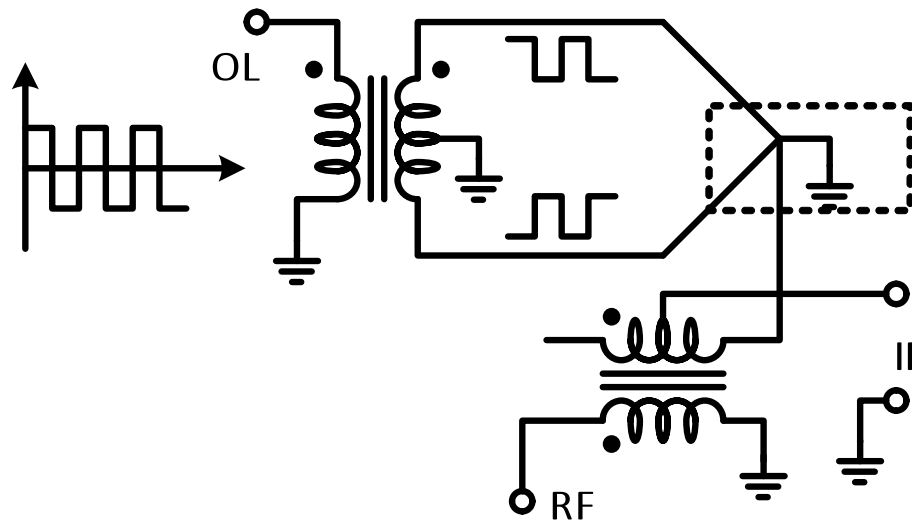
El voltaje de OL debe ser suficientemente alto para que los diodos actúen como conmutadores.



# Mezclador doblemente balanceado

## Principio de funcionamiento

En la parte positiva del ciclo de OL:

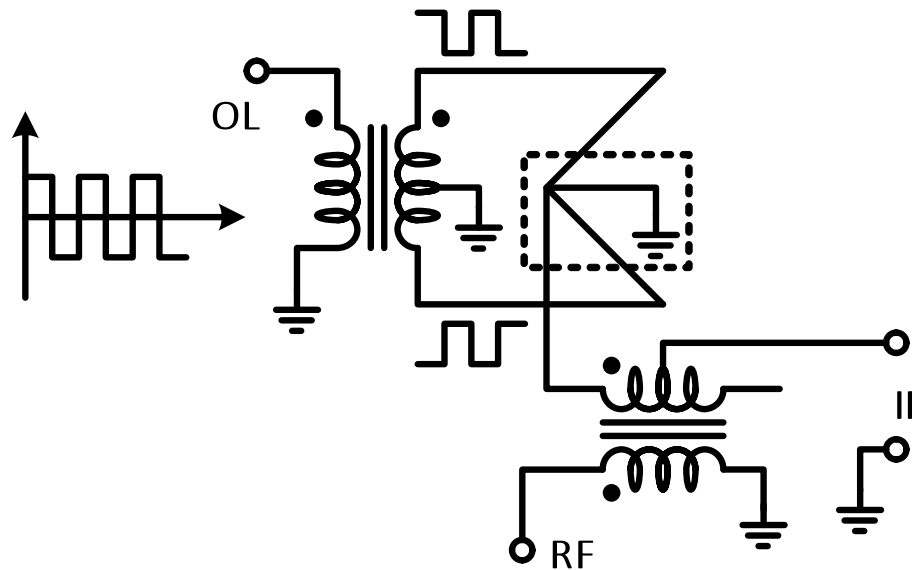


$$V_{IF} = V_{RF}$$

# Mezclador doblemente balanceado

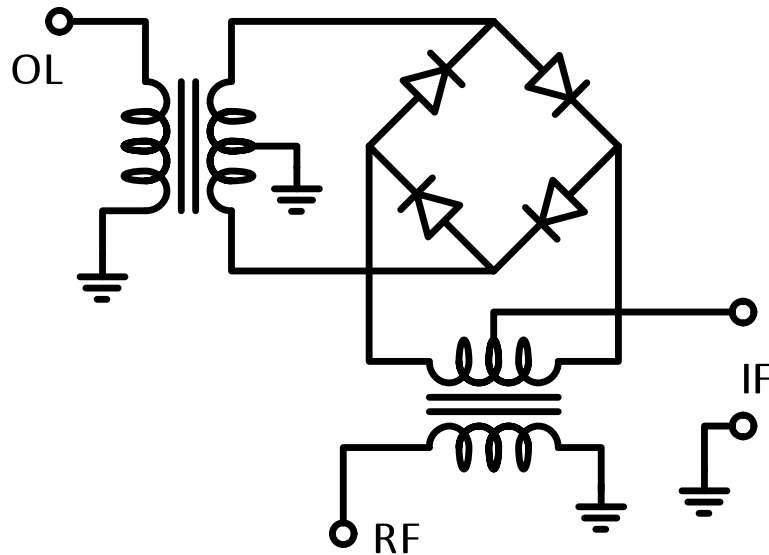
## Principio de funcionamiento

En la parte positiva del ciclo de OL:



$$V_{IF} = -V_{RF}$$

## Mezclador doblemente balanceado



La salida en el puerto IF es la multiplicación de la señal en el puerto RF, multiplicado por una señal cuadrada (@ $f_{OL}$ ) de amplitud 1.

$$v_{IF} = V_{RF} \cos(\omega_{RF}t) \text{sgn}(\omega_{OL})$$

# Mezclador doblemente balanceado

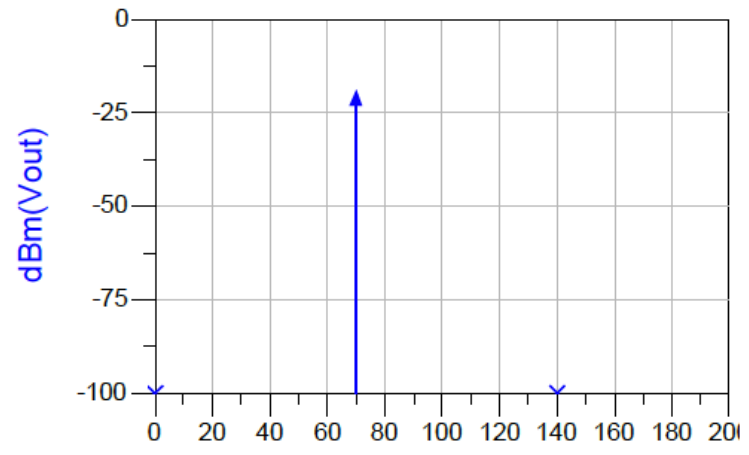
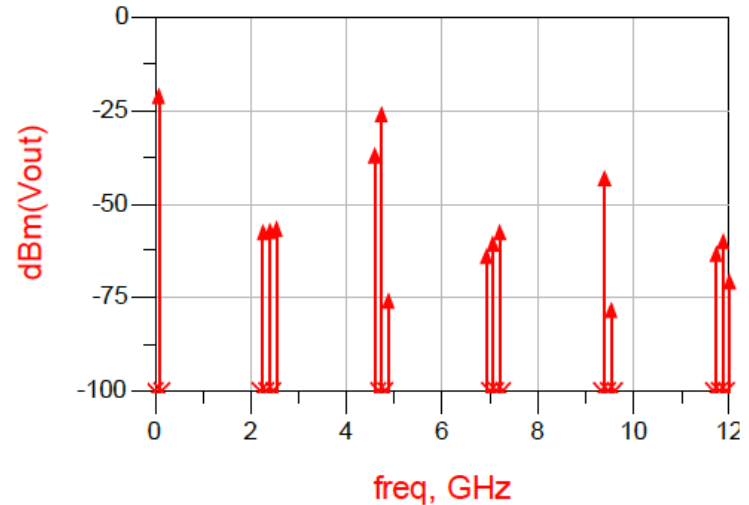
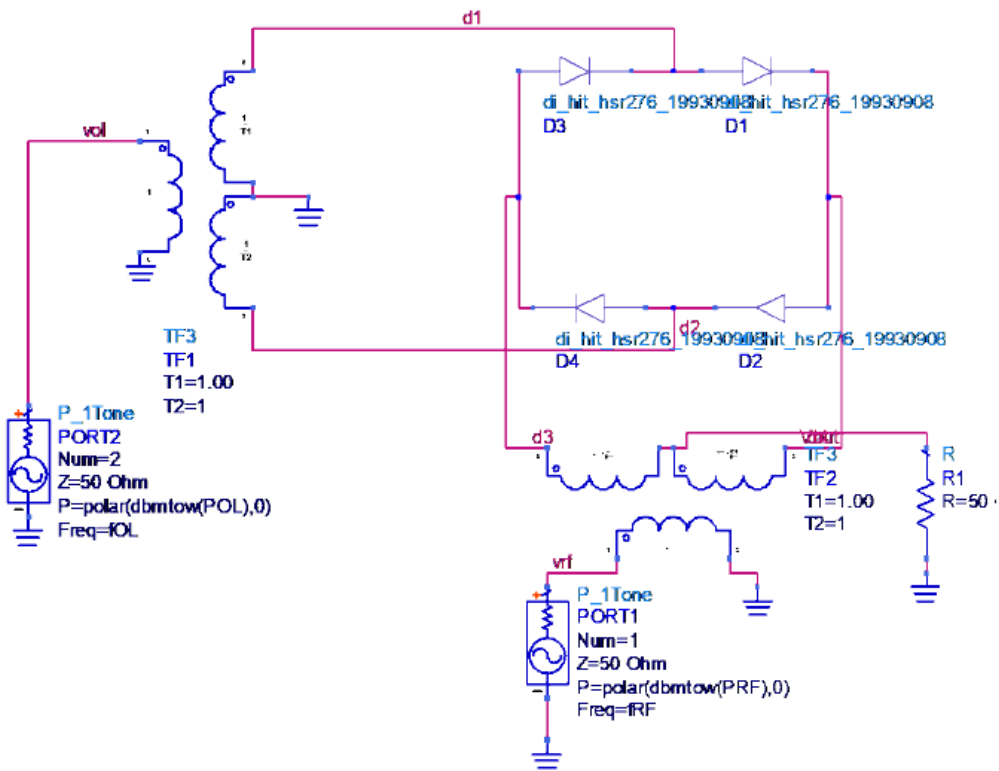
## Ejemplo Down-Conversion (I)

**HARMONIC BALANCE**

HarmonicBalance  
HB1  
Freq[1]=fOL  
Freq[2]=fRF  
Order[1]=5  
Order[2]=5

VAR  
VAR1  
fOL=2.33 GHz  
fRF=2.4 GHz

VAR  
VAR2  
POL=7  
PRF=10



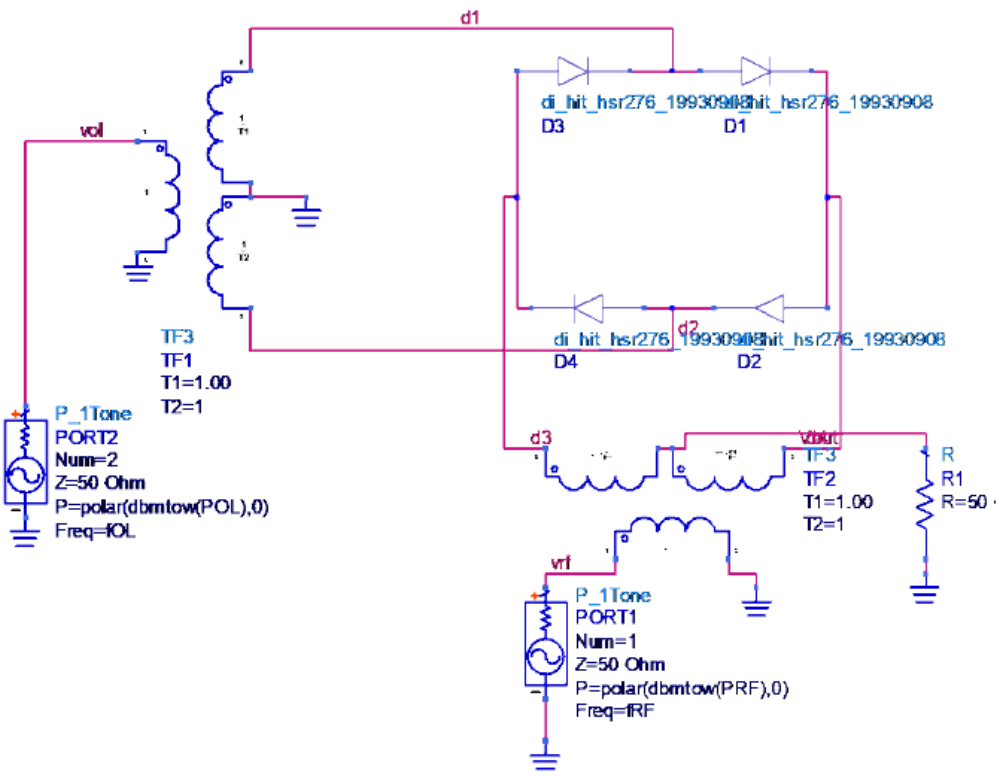
# Mezclador doblemente balanceado Ejemplo Down-Conversion (II)

**HARMONIC BALANCE**

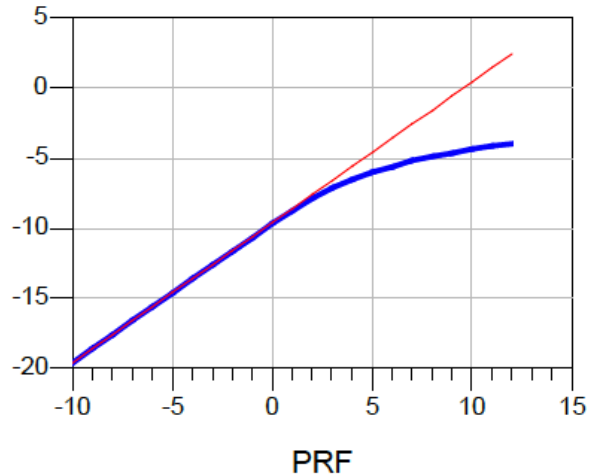
HarmonicBalance  
HB1  
Freq[1]=fOL  
Freq[2]=fRF  
Order[1]=5  
Order[2]=5

VAR  
VAR1  
fOL=2.33 GHz  
fRF=2.4 GHz

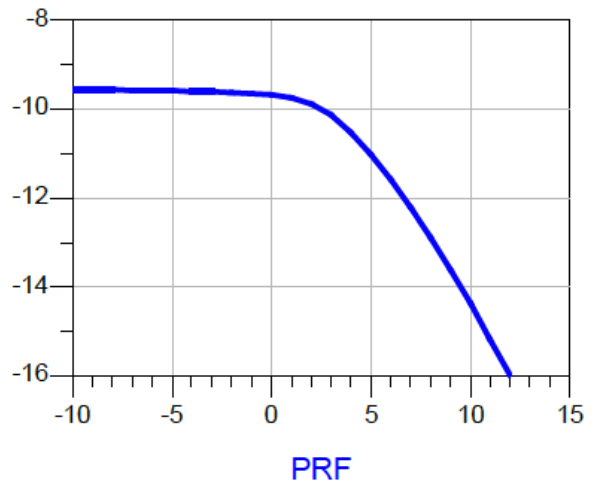
VAR  
VAR2  
POL=7  
PRF=-10



PRF-9.578  
PIF

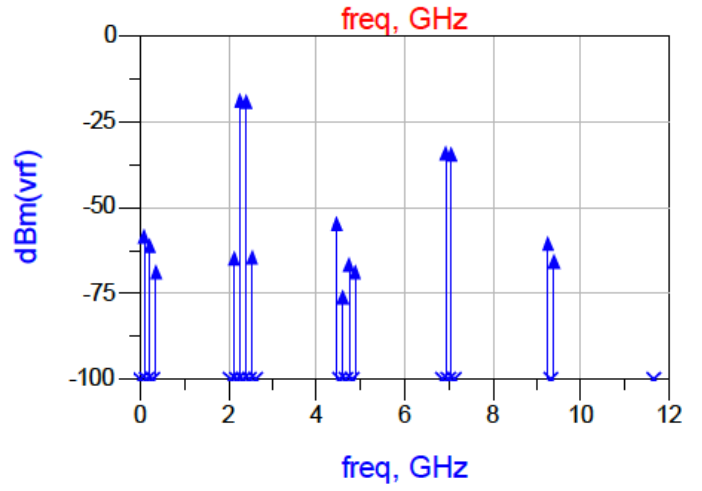
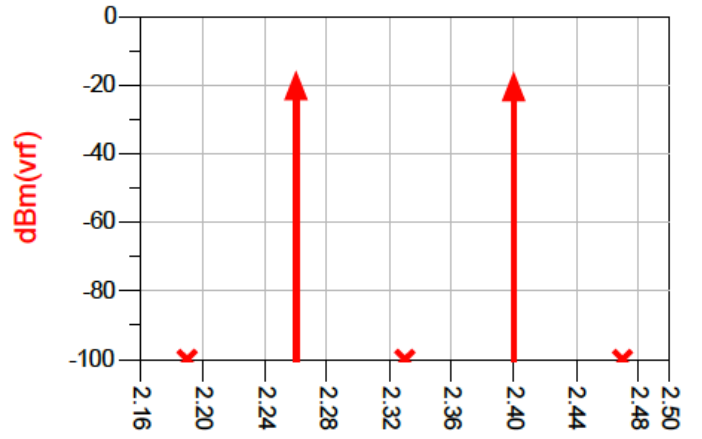
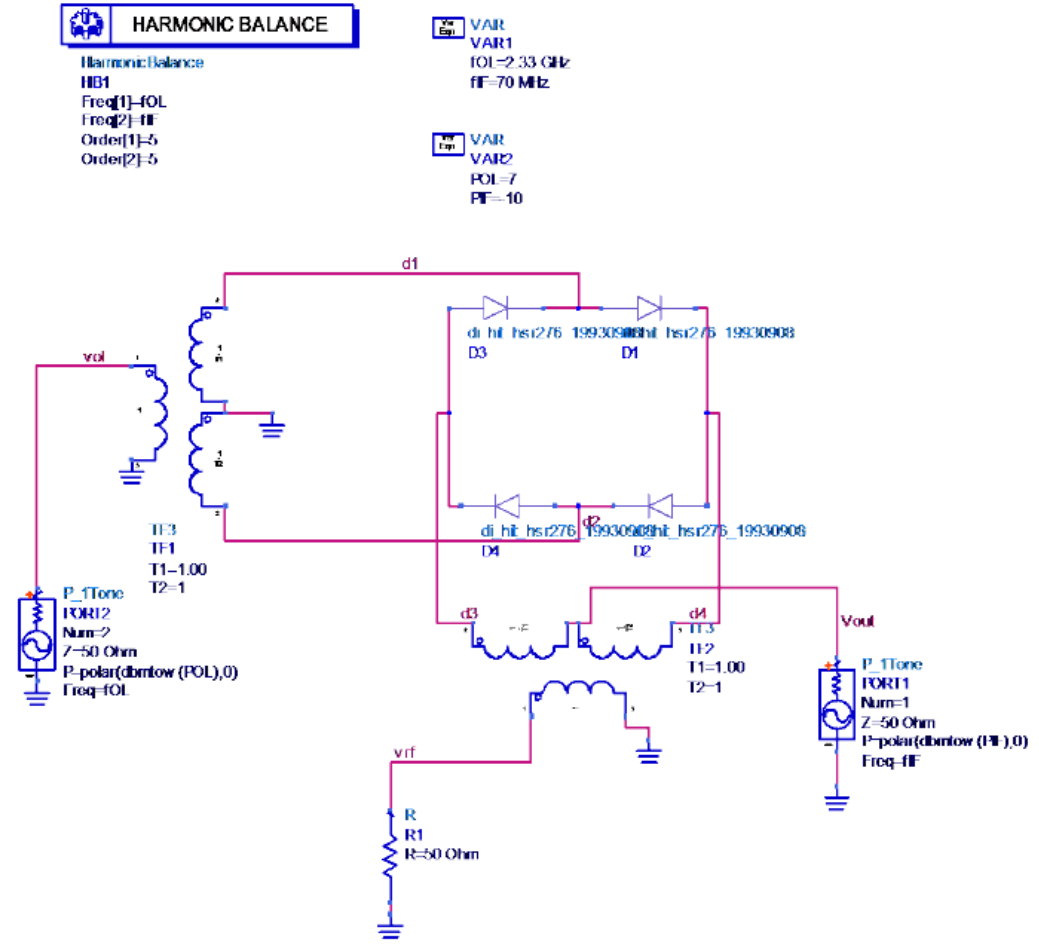


GC



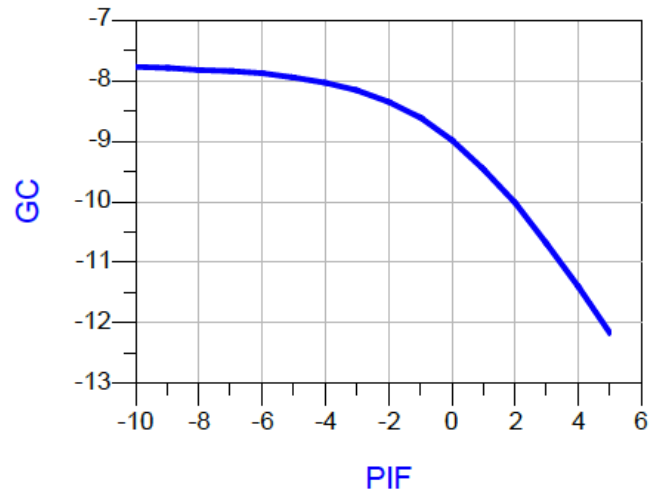
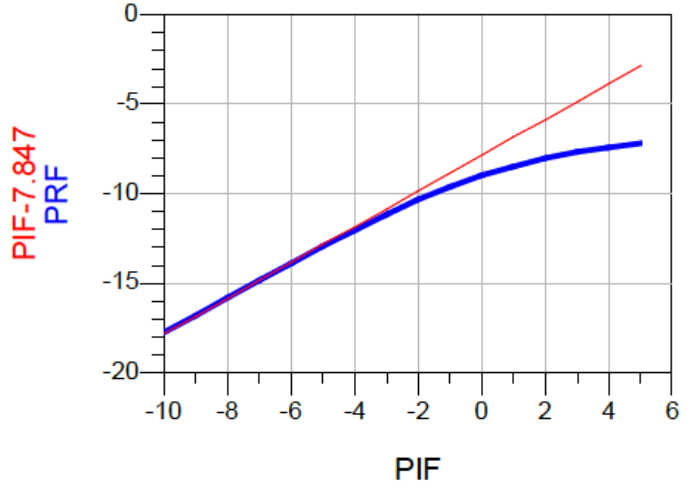
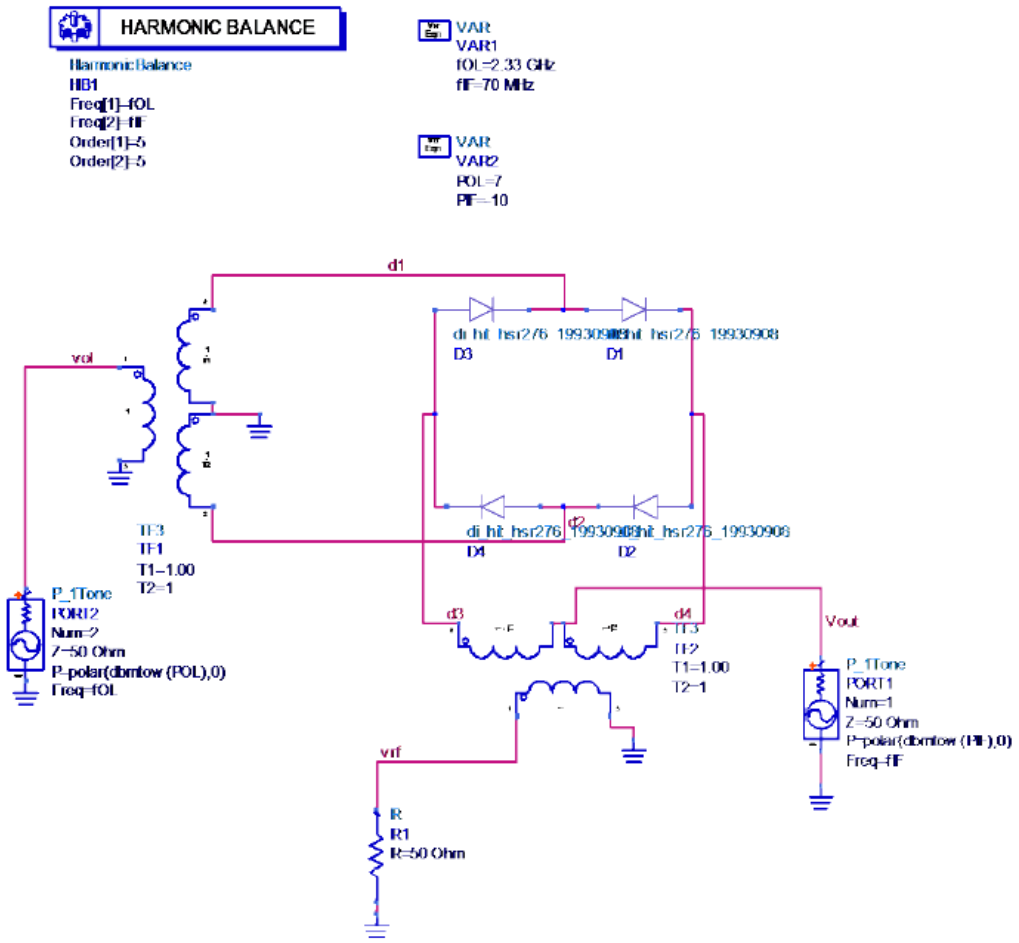
# Mezclador doblemente balanceado

## Ejemplo Up-Conversion (I)

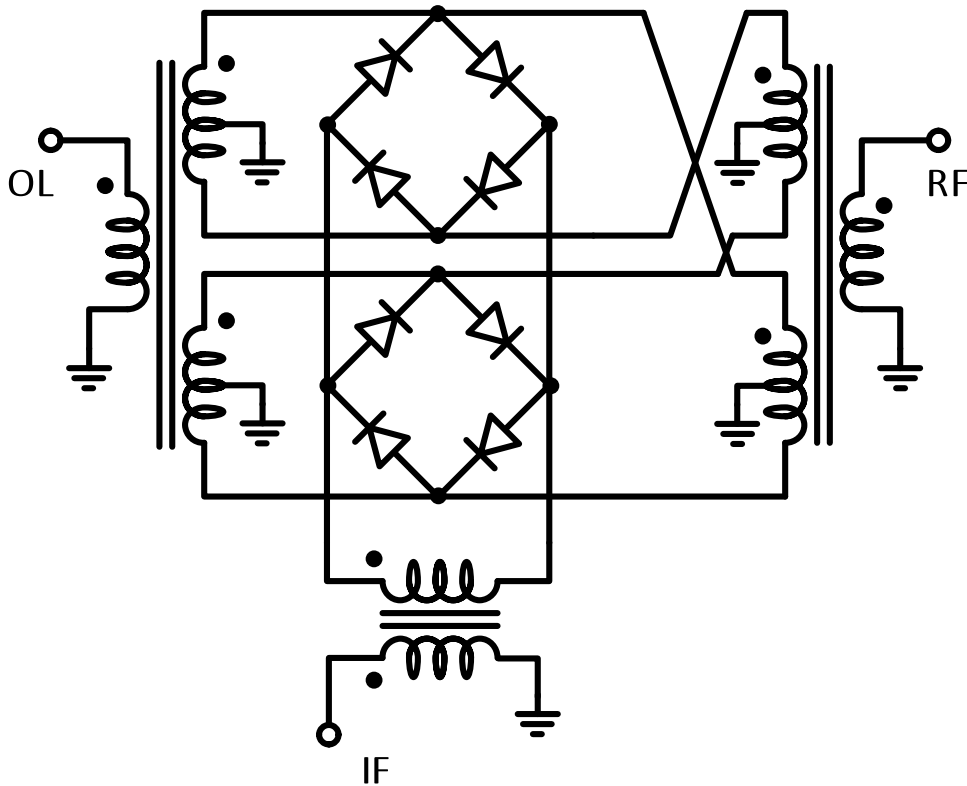


# Mezclador doblemente balanceado

## Ejemplo Up-Conversion (II)



## Mezclador triplemente balanceado



Consta de dos mezcladores doblemente balanceados:

- Aislamiento entre puertos.
- Gran ancho de banda.
- Anchos de banda superpuestos para RF, OL e IF.
- Mayor supresión de armónicos.



### Mezcladores pasivos - Resumen

Tipo de Mezclador	Ventajas	Desventajas
<b>Simple</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sencillo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento entre puertos.</li> </ul>
<b>Balanceado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rechazo de ciertos espurios.</li> <li>• Supresión del ruido AM del OL.</li> <li>• Aislamiento OL/RF y RF/OL.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere mayor nivel de OL.</li> </ul>
<b>Doblemente balanceado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los puertos están aislados.</li> <li>• Mayor supresión de espurios.</li> <li>• Ancho de banda.</li> <li>• Puntos de intercepción relativamente altos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere mayores niveles de OL.</li> <li>• Requiere 2 baluns y 4 diodos.</li> <li>• Se requiere que los diodos sean 'idénticos'.</li> <li>• Transformadores distribuidos aumentan la complejidad.</li> </ul>
<b>Triplemente balanceado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor linealidad.</li> <li>• Anchos de banda de RF, OL e IF superpuestos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor complejidad (3 baluns y 8 diodos).</li> <li>• Requiere mayores niveles de OL.</li> </ul>

## Mezcladores activos

Utilizan un dispositivo no lineal que combina mezclado y amplificación en un solo componente.

### Ventajas:

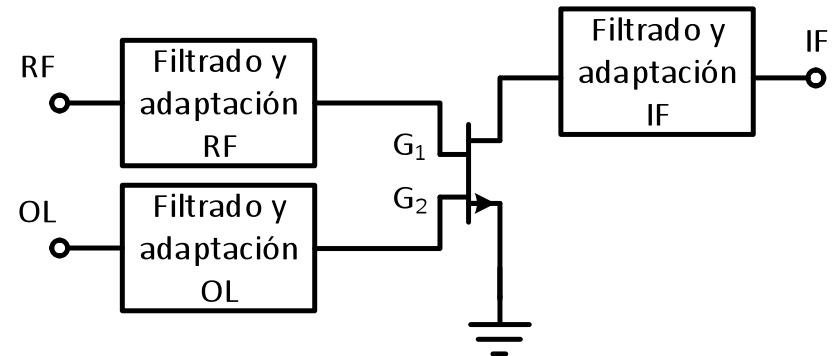
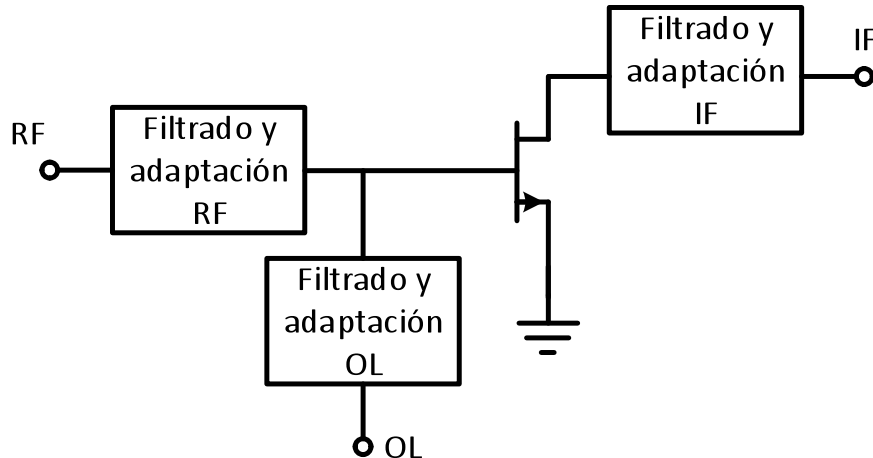
- Pueden presentar ganancia de conversión.
- Compatibilidad con circuitos integrados monolíticos.
- Sencillez. Aptos para utilizarse en circuitos balanceados.
- Requieren menor nivel de señal de OL.

Pueden utilizarse FETs, HBTs, o HEMTs como dispositivos no lineales.

## Mezclador a FET

En los mezcladores a FET se tiene mejor aislamiento IF – OL e IF – RF dado que se puede considerar como dispositivo unilateral ( $S_{21} \approx 0$ ).

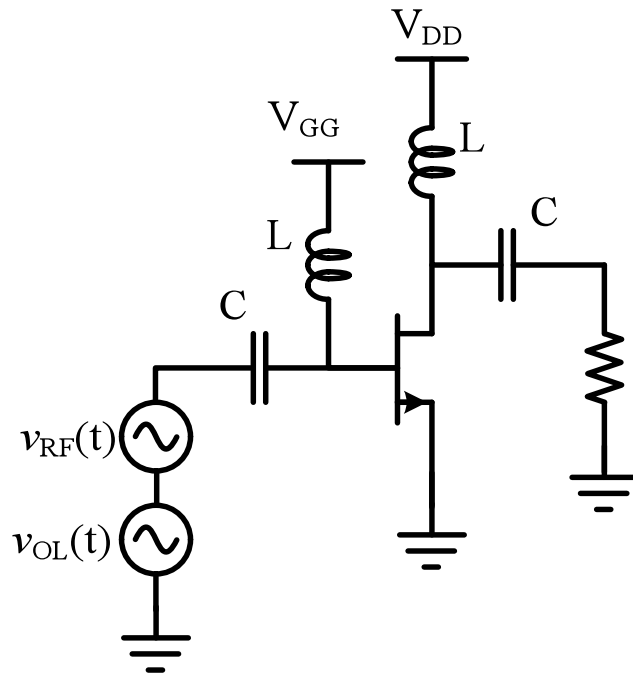
Si se utilizan dispositivos de puerta dual se obtiene un aislamiento inherente entre los puertos RF – OL.



Una desventaja de los FET es el mayor ruido  $1/f$ , pero puede evitarse en parte utilizando un mayor valor de  $f_{IF}$ .

## Mezclador a FET

El mecanismo principal de mezclado es la transconductancia variable en el tiempo.



$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} = g_{mo} \left( 1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)$$

$$g_{mo} = \frac{2I_{DSS}}{V_P}$$

## Mezclador a FET

Considerando sólo la señal de OL, suficientemente grande, está presente a la entrada del FET:

$$v_{GS}(t) = V_{GG} + V_{OL} \cos(\omega_{OL}t)$$

La transconductancia en el punto de operación Q ( $V_{GG}$ ,  $I_{DS}$ ):

$$g_{mQ} = g_{mo} \left( 1 - \frac{V_{GG}}{V_T} \right)$$

## Mezclador a FET

La transconductancia del FET modulada por la señal OL es:

$$g_m(t) = g_{mQ} + \frac{g_{mo}}{|V_P|} V_{OL} \cos \omega_{OL} t$$

Si se inyecta una señal de RF tal que  $V_{RF} \ll V_{OL}$ :

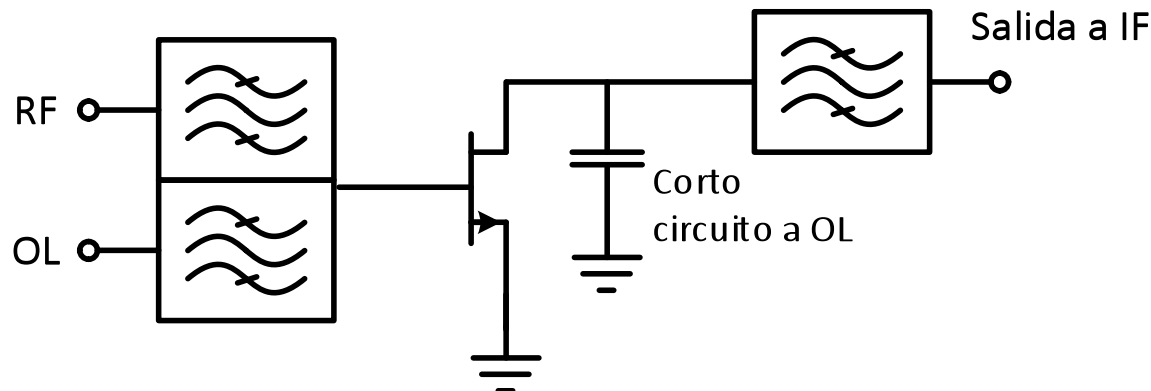
$$\begin{aligned} i_D(t) &= g_m(t) V_{RF} \cos \omega_{RF} t \\ &= g_{mQ}(t) V_{RF} \cos \omega_{RF} t + \frac{g_{mo}}{V_P^2} V_{OL} V_{RF} \cos \omega_{RF} t \cos \omega_{OL} t \end{aligned}$$

## Mezclador a FET

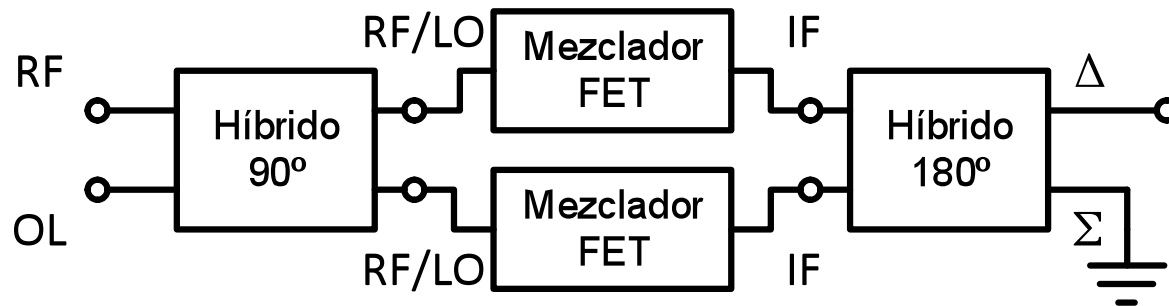
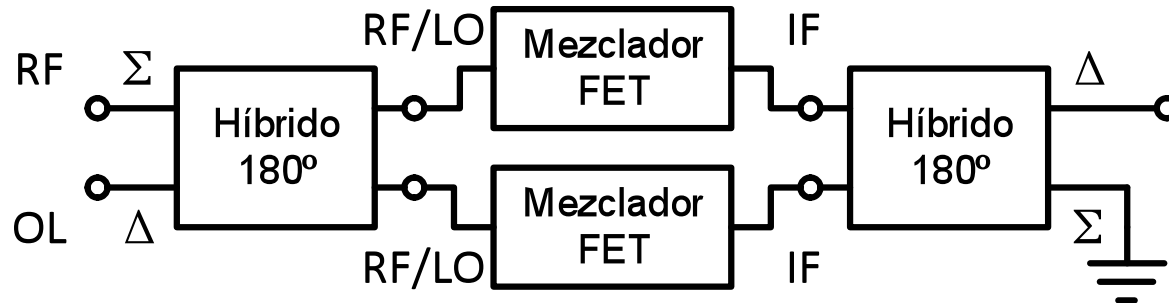
Para maximizar la ganancia de conversión se maximiza el margen de variación de la transconductancia.

Polarizar el transistor cerca del valor de *pinch-off* para que el transistor permanezca en la región de saturación la mayor parte del ciclo de OL.

Para ello se cortocircuita el terminal de drenador a la frecuencia de OL y sus armónicos.



## Mezcladores a FET balanceados



- Mejoran el aislamiento RF – OL.
- Rechazo al ruido AM del OL.
- Menores espurios.
- Mayor rango dinámico.