

Capítulo 12: Mezcladores en microondas

Objetivo: La necesidad de circuitos conversores de frecuencia en los modernos sistemas de comunicaciones hace importante el estudio de mezcladores en microondas. El aumento en la capacidad de información lleva a que los sistemas de comunicaciones funcionen en bandas cada vez más elevadas. Esto supone la necesidad de circuitos que conviertan dichas frecuencias en las correspondientes de banda base. La utilización de dispositivos de estado sólido posibilita la realización de mezcladores más o menos integrados en microondas.

El estudio de mezcladores tendrá que abordar aquellos basados en diodos que llegan a frecuencias más elevadas pero tienen el inconveniente de las pérdidas asociadas a los mismos. Frente a esta opción tecnológica se encuentra la utilización de transistores FET que aunque no llegan a frecuencias tan elevadas, tienen la ventaja de la ganancia que llevan pareja.



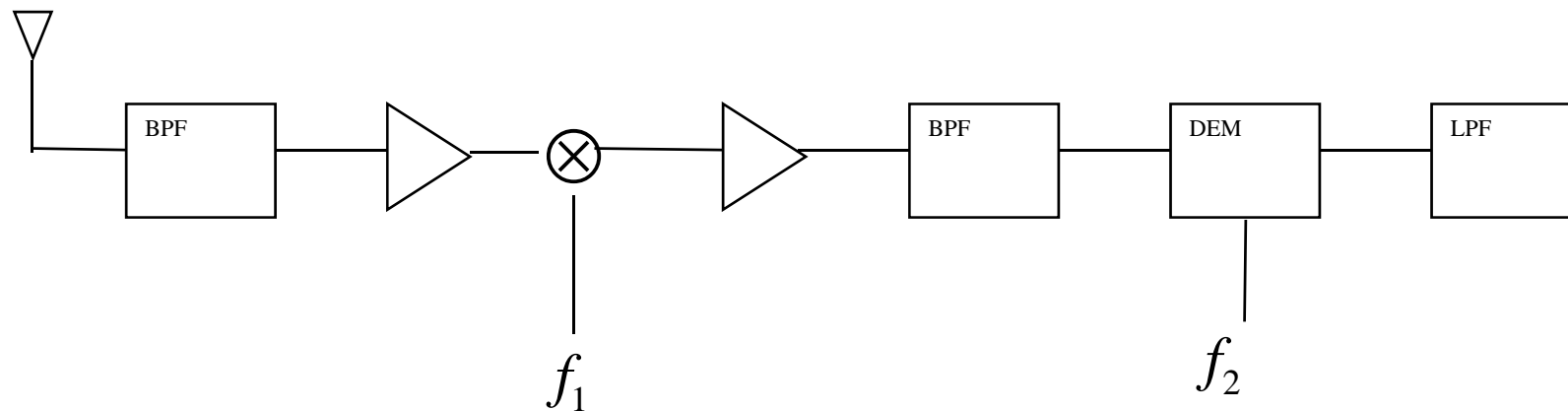
ÍNDICE

- Introducción a los mezcladores.
- Principio de funcionamiento.
- Parámetros básicos y terminología.
- Tipos de mezcladores.
- Mezcladores pasivos.
- Mezcladores activos.
- Conclusiones.



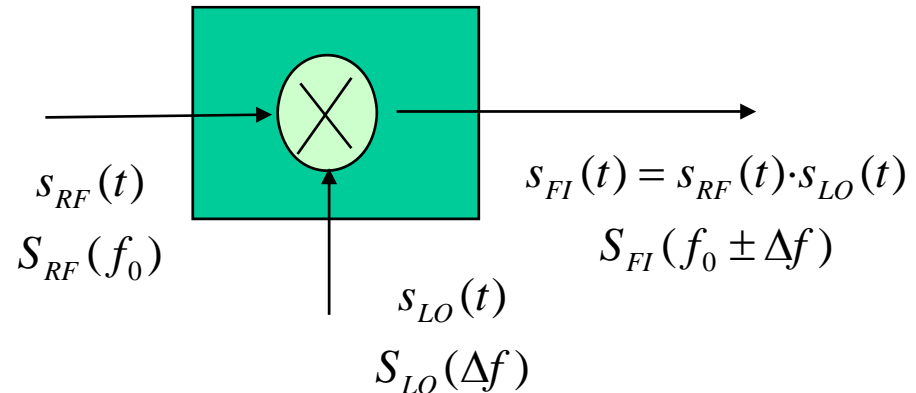
INTRODUCCIÓN A LOS MEZCLADORES

- Definición: dispositivo que realiza un desplazamiento en frecuencia de una señal de entrada modulada, conservando su modulación, a otra centrada en otra frecuencia.
- Frecuencias que entran en juego:
 - Frecuencia de radiofrecuencia, RF: la que hay que trasladar de frecuencia.
 - Frecuencia intermedia IF: la nueva frecuencia resultante.
 - Frecuencia de oscilador LO: la que provoca el proceso de mezcla
- Cadena de un receptor superheterodino:



INTRODUCCIÓN A LOS MEZCLADORES II

- Representación de un mezclador:



- Forma de la señal de entrada

- Señal de oscilador: $s_{RF}(t) = V_{RF}(1 + mx(t))\cos(\omega_{RF}t + \Delta\phi y(t))$

- Producto de ambas $s_{OL}(t) = V_{OL}\cos(\omega_{OL}t)$

$$\begin{aligned}
 s_{FI}(t) &= s_{RF}(t) \cdot s_{OL}(t) = KV_{RF}V_{OL}(1 + mx(t))\cos(\omega_{RF}t + \Delta\phi y(t))\cos(\omega_{OL}t) = \\
 &= \frac{K}{2}V_{RF}V_{OL}(1 + mx(t))\cos((\omega_{RF} + \omega_{OL})t + \Delta\phi y(t)) + \\
 &\quad + \frac{K}{2}V_{RF}V_{OL}(1 + mx(t))\cos((\omega_{RF} - \omega_{OL})t + \Delta\phi y(t))
 \end{aligned}$$

- Consecuencias:

- K es el factor de ganancia o pérdidas del mezclador
- En la salida están presentes la suma como la diferencia de frecuencias
- Las características de la señal de entrada se mantiene.



INTRODUCCIÓN A LOS MEZCLADORES III

- Del resultado anterior se derivan dos tipos de mezcladores
 - Conversor superior (up-converter): traslada la señal de entrada a frecuencias superiores.
 - Conversor inferior (down-converter): traslada la señal de entrada a frecuencias inferiores.
- Necesidad de un filtro para obtener la frecuencia deseada



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO (I)

- La multiplicación anterior no se puede realizar directamente y se requiere el uso de dispositivos que tengan una función de transferencia I-V no lineal.
 - Diodos (Schottky)
 - Transistores bipolares
 - Transistores de efecto de campo
- Relación general de transferencia:

$$I = k_0 + k_1V + k_2V^2 + k_3V^3 + \dots$$

- Señal de entrada es la suma de la señal RF y OL

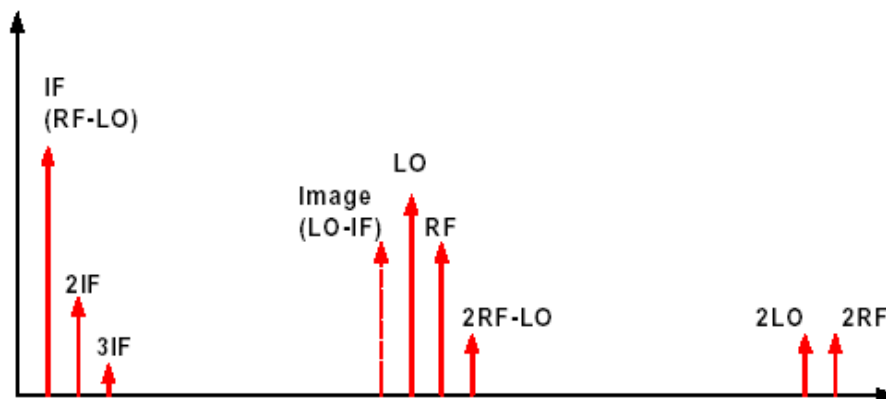
$$I = \sum_{m,n} C_{m,n} \cos[(m\omega_{RF} \pm n\omega_{OL})t]$$

- Los factores C_{mn} dependen de k_i y las amplitudes de RF y OL
- Términos no deseados: espurios de señal, frecuencias de intermodulación de orden $m+n$: $m\omega_{RF} + n\omega_{OL}$
- Según crece el orden de la potencia el valor de k disminuye por lo que la importancia de esos “batidos” es cada vez menor.
- Interesa un factor k_2 elevado pues determina la amplitud de la señal suma y diferencia.



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO (II)

- Segunda clasificación de mezcladores: por la posición en el espectro de la frecuencia de LO respecto a la de RF
 - Inyección lateral superior: $f_{LO} > f_{RF}$
 - Inyección lateral inferior: $f_{LO} < f_{RF}$
- Tipos de mezcladores:
 - Convertidor inferior, empleado en receptores:
 - Por inyección lateral superior: $f_{LO} > f_{RF}$
 - Por inyección lateral inferior: $f_{LO} < f_{RF}$
 - Convertidor superior, empleado en transmisores:
 - Por inyección lateral superior: $f_{LO} > f_{RF}$: $f_{RF} = f_{LO} - f_{FI}$
- Espectro de señal de salida un convertidor inferior por inyección lateral inferior:



Concepto de frecuencia imagen



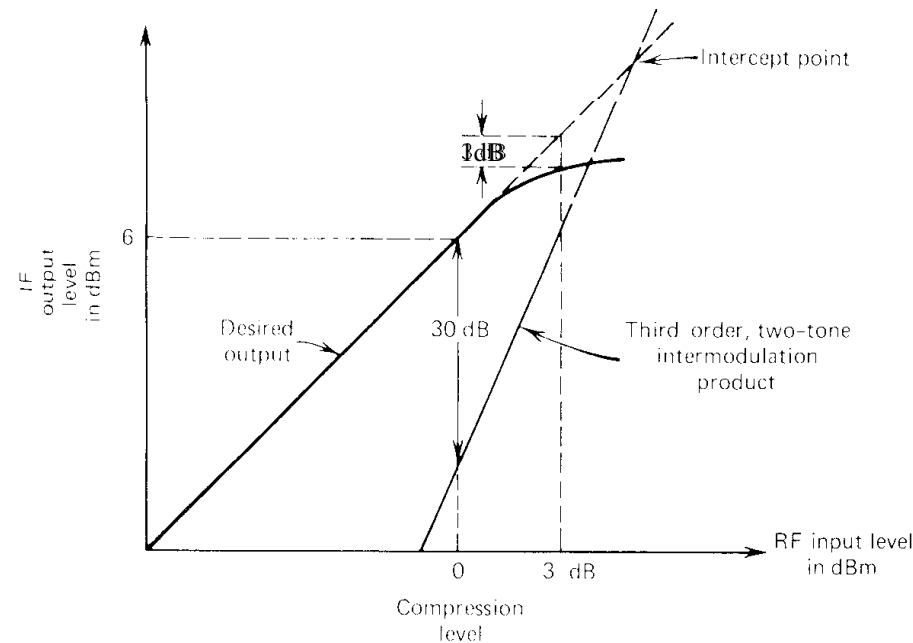
PARÁMETROS BÁSICOS Y TERMINOLOGÍA

- Frecuencias de funcionamiento: (especificar LO, FI y RF)
 - Banda estrecha: la separación de las puertas es por filtrado (no pueden solaparse las bandas)
 - Banda ancha: no requieren filtrado
- Pérdidas (ganancia de conversión): cociente entre la potencia de la señal de salida a FI y la de entrada a RF (en dB).
- Factor de ruido: el cociente entre la potencia total de ruido a la salida del cuadripolo (a la FI) dividida entre la que potencia de ruido que habría si el cuadripolo no generara ruido.
 - Problema: existen dos bandas de RF cuyo batido se convierte en la banda de FI de la que se quiere medir el ruido.
 - Definición de temperatura en simple banda (se rechaza la banda imagen)
 - Definición de temperatura en doble banda (se contempla la banda imagen)
- Punto de compresión: punto para el que el nivel de potencia de salida en FI es 1 dB inferior al que correspondería a la característica lineal.
- Rango dinámico: margen de potencia en que no se degrada su funcionamiento.



PARÁMETROS BÁSICOS Y TERMINOLOGÍA II

- Punto de intercepción de tercer orden: indica el nivel de los productos de tercer orden cuando hay dos señales de entrada. Es el punto en el que la recta del espurio de tercer orden interseca a la de entrada.



- Linealidad: capacidad de mantener el nivel de entrada.
- Aislamiento: representa el grado de acoplamiento entre los puertos del mezclador: pérdidas que sufre la señal al pasar de una puerta a otra sin conversión.



PARÁMETROS BÁSICOS Y TERMINOLOGÍA III

- Mezclas espurias: nivel de pérdidas con el que se recibe la correspondiente mezcla respecto al nivel del armónico principal. Se especifican para un determinado nivel de potencias de entrada.

P _{LO} =10 dBm, P _{RF} =0 dBm					
RF\LO	1	2	3	4	5
1	0	31	47	42	32
2	38	45	39	48	46
3	39	49	37	52	42
4	64	60	58	56	59
5	71	69	59	72	55

Atenuación del armónico correspondiente

- Para otros valores de potencia basta tener en cuenta la dependencia polinómica.

$$L = L_{\text{nom}} - \Delta P_{RF} [dB] \cdot (m - 1) - \Delta P_{OL} [dB] \cdot (n - 1)$$



TIPOS DE MEZCLADORES

- Requisitos: fuerte no linealidad, propiedades eléctricas uniformes, bajo ruido, baja distorsión.
- Dispositivos:
 - Mezcladores pasivos: basados en diodos.
 - Diodo Schottky: gran velocidad de conmutación. Llega a muy altas frecuencias.
 - Mezcladores activos: basados en transistores.
 - Transistor bipolar: no es popular por no llegar a muy altas frecuencias.
 - FET: presenta ganancia de conversión pero no llega a frecuencias tan altas como el diodo.
 - Funcionan con las señales de OL y RF aplicadas a la puerta (gate-pumped) y un filtro en el drenador que obtiene FI.
 - » El OL modela la transconductancia.
 - » Máxima ganancia de conversión y mínimo ruido.
 - El OL actúa sobre el drenador (drain-pumped). Menos ventajas que el anterior.
 - Mezclador resistivo: la OL se aplica a la puerta y la RF al drenador



MEZCLADORES PASIVOS: principio de funcionamiento

- Se suelen denominar mezcladores resistivos ya que el batido se consigue por una resistencia variable con el tiempo.
 - R_j es la responsable del comportamiento cuadrático de la función I-V

- Al aplicar el OL resulta una conductancia:

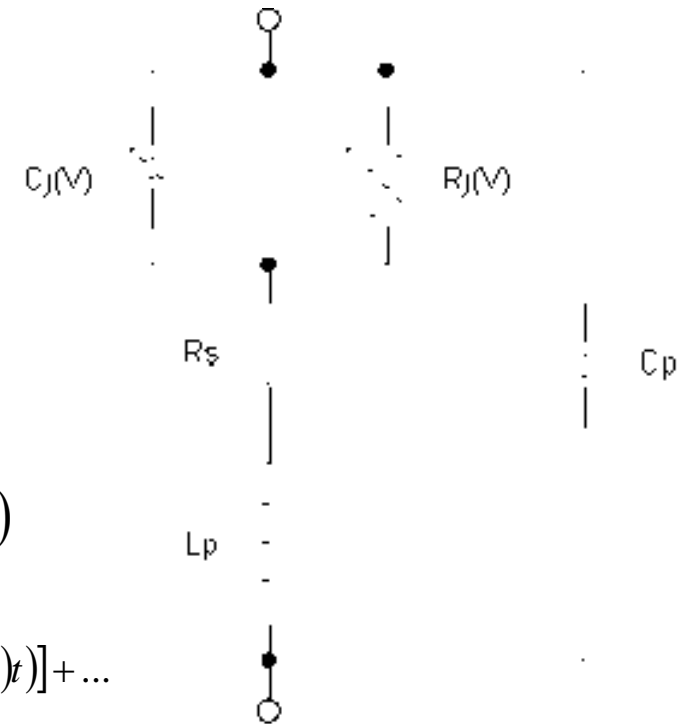
$$g(t) = \frac{dI}{dV} = G_0 + G_1 \cos(\omega_{OL}t) + G_2 \cos(2\omega_{OL}t) + \dots$$

Con $G_0 > G_i$ para que la conductancia no sea negativa.

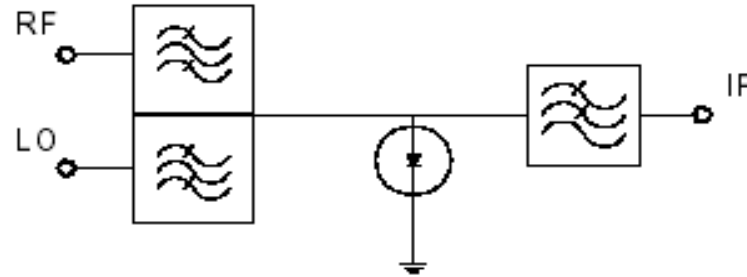
- Si se aplica, ahora, una señal de RF $v_s(t) = V_s \cos(\omega_{RF}t)$ resulta:

$$i(t) = g(t)v_s(t) = G_0V_s \cos(\omega_{RF}t) + \frac{G_1V_s}{2} [\cos((\omega_{RF} - \omega_{OL})t) + \cos((\omega_{RF} + \omega_{OL})t)] + \dots$$

- El rendimiento de un mezclador con diodo está determinado por la forma de la onda de conductancia y por las impedancias de terminación del diodo.



MEZCLADOR SIMPLE



- Dificultad: las puertas de RF y LO deben separarse mediante un diplexor.
 - Aislamiento entre RF y LO es pequeño.
 - No hay supresión de espurios.
- Procedimiento de diseño:
 - Elección de un diodo apropiado para la aplicación: frecuencia funcionamiento, nivel LO requerido, tipo de encapsulado y coste.
 - Diseño de un filtro paso bajo IF: adaptación en IF y alta impedancia en LO y RF.
 - Filtros RF y LO:
 - Adaptar las puertas
 - Aislar, en la medida de lo posible, las dos entradas.
 - Adaptación:
 - Impedancia que presenta el diodo es variable con el tiempo y depende del nivel de LO y de la frecuencia.



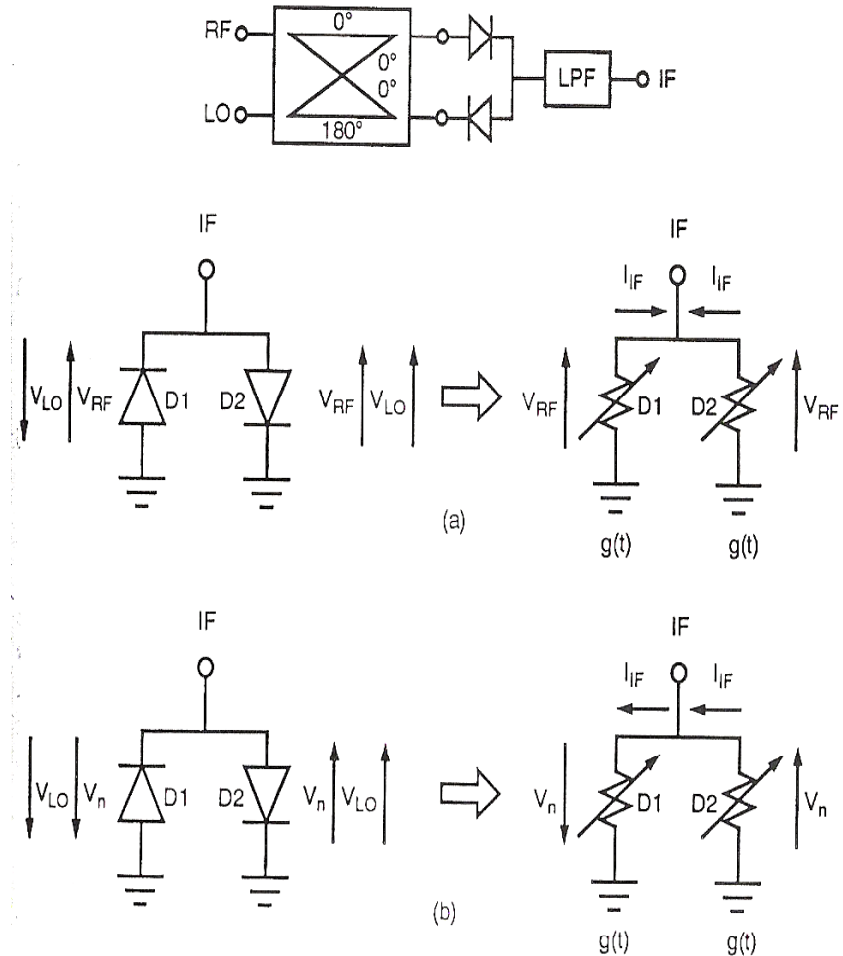
MEZCLADORES SIMPLEMENTE BALANCEADOS

- Superan el inconveniente de los simples del poco aislamiento en RF y LO.
- Ventajas adicionales:
 - Mejor gestión de la potencia.
 - Rechazo de algunos espurios y ruido AM del LO
- Inconvenientes:
 - Pobre rendimiento de conversión.
 - Necesidad de mayor potencia de LO.
- Topología:
 - Empleo de un híbrido para conectar las puertas de entrada al diodo.
 - La diferencia de fase entre los puertos de salida es crítica.

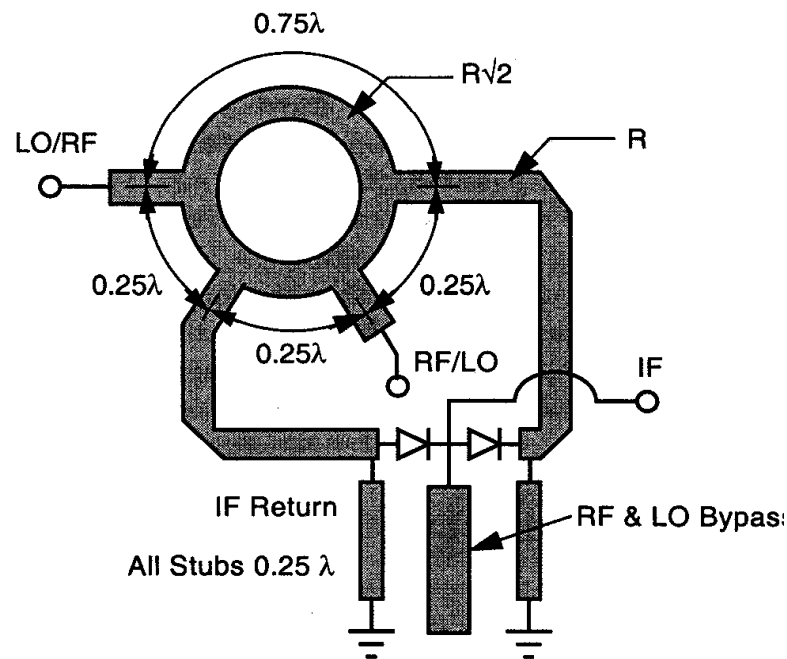


MEZCLADOR BALANCEADO CON UN HÍBRIDO DE 180° (I)

- Las puertan de LO y RF se encuentran idealmente aisladas.
- En los puertos de salida del híbrido se encuentran la suma y la diferencia de las señales de LO y RF.
- El voltaje de RF y la onda de conductancia están en fase en los diodos por lo que se suman en la unión de los diodos.
- Esta situación no es la misma para las componentes de ruido de LO: entran en el mezclador por la puerta de LO y en la unión se encuentran desfasadas.
 - Las señales espurias de LO se cancelan.



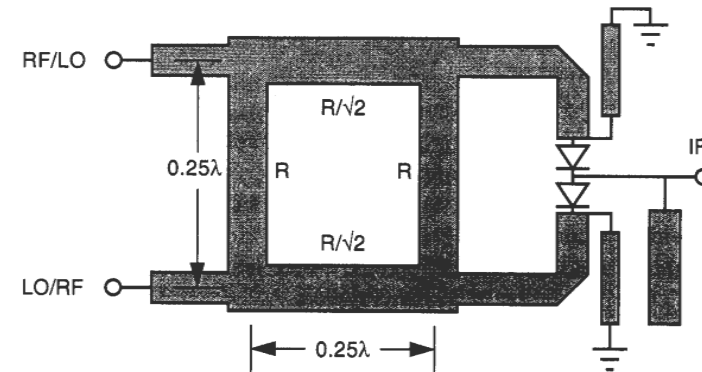
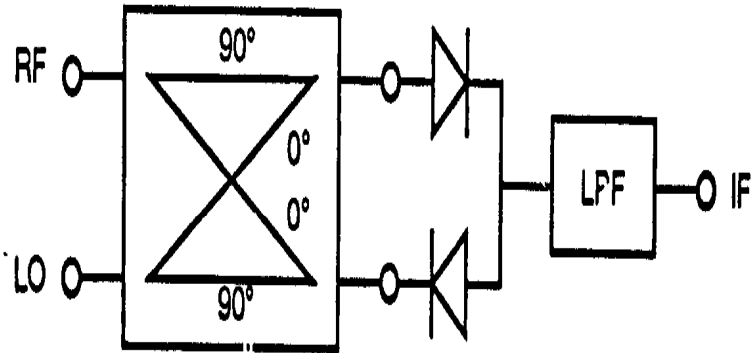
MEZCLADOR BALANCEADO CON HÍBRIDO DE 180° II



- Cualquiera de los puertos de entrada puede utilizarse para la señal de RF y LO.
- Si los productos de mezcla son $m f_{RF} \pm n f_{LO}$
 - La señal de RF se aplica al puerto suma, se eliminan espurios con m par y n impar.
 - La señal de LO se aplica al puerto suma, se eliminan espurios con m impar y n par.
- El filtro IF debe proporcionar un cortocircuito a masa para la frecuencia de RF para que las pérdidas de conversión sean las mínimas (no es necesario a LO porque están en contrafase por lo que el punto de unión es una tierra virtual)
- Los dos stubs en cortocircuito sirven para que la FI no se introduzca en el híbrido.



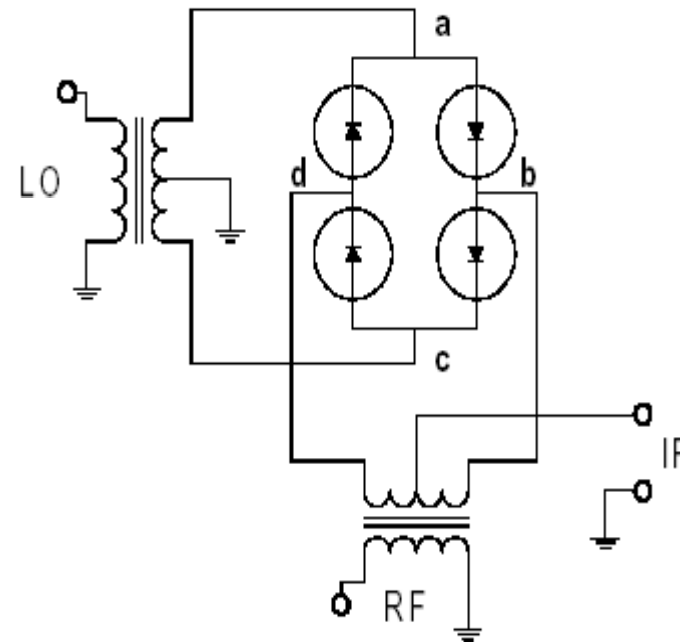
MEZCLADOR BALANCEADO CON HÍBRIDO DE 90°



- El híbrido es simétrico por lo que el intercambio no afecta al mezclador.
- Desventajas:
 - El aislamiento entre RF y LO es pobre.
 - No se rechazan espurios con m par y n impar o viceversa.
 - No puede trabajar como convertidor superior a no ser que se cambie el sentido del diodo pero entonces no funcionaría como convertidor inferior.

MEZCLADOR DOBLEMENTE BALANCEADO

- Hace uso de cuatro diodos en una configuración en anillo o estrella.
- Ventajas:
 - Aislamiento inherente en todas las puertas.
 - Rechazo del ruido y espurios LO.
- Desventajas:
 - Utilizar cuatro diodos y dos híbridos.
- Principio de funcionamiento:
 - La señal de LO activa alternativamente los diodos de la izquierda y la derecha.
 - Los puntos a y c son tierras virtuales para la señal de RF.
 - Una señal de RF en fase y otra en contrafase alternativamente se cambian al puerto de IF bajo el control de LO.



RESUMEN DE MEZCLADORES PASIVOS

Tipo de mezclador	Aislamiento entre puertas			Rechazo de ruido AM y espurio de OL	Rechazo espurios orden bajo	Requisito potencia de LO	Punto de intercepción de tercer orden	Punto compresión a 1 dB
	RF-IF	LO-RF	LO-IF					
Simple	Depende de los filtros	Depende de los filtros	Depende de los filtros	No existe	Ninguno	Baja	Bajo	Bajo
Balanceado con híbrido 180°	Depende de los filtros	Bueno	Depende de los filtros	Bueno	(2,2) y (2,1) ó (1,2)	Moderada	Moderado	Moderado
Balanceado con híbrido 90°	Depende de los filtros	Pobre	Depende de los filtros	Bueno	(2,2)	Moderada	Moderado	Moderado
Doblemente balanceado (anillo)	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	(2,2), (2,1) y (1,2)	Alta	Alto	Alto



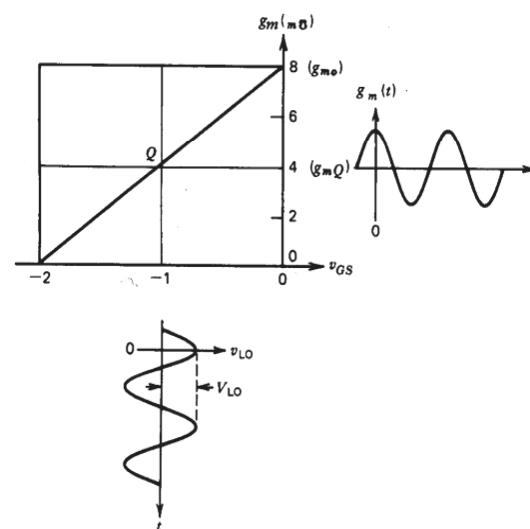
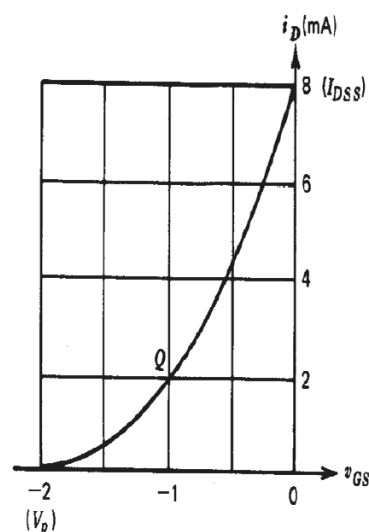
MEZCLADORES ACTIVOS

- Se utilizarán fundamentalmente FET
- Ventajas:
 - Compatibilidad con circuitos integrados monolíticos.
 - Pueden presentar ganancia de conversión
- Desventajas:
 - No llegan a frecuencias tan altas como los diodos.
 - Son más sencillos para utilizarse en circuitos balanceados.



MEZCLADORES ACTIVOS: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO (I)

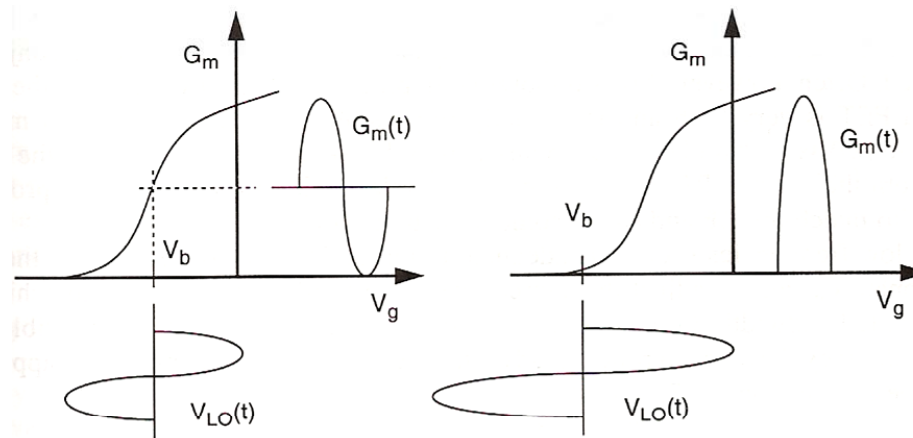
- Se aplica un voltaje grande de LO entre la puerta y la fuente (gate pumped) que hace que varíe temporalmente la transconductancia.
- Valor de la corriente:
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2$$
- Expresión de la transconductancia:
$$g_m = \frac{di_D}{dv_{GS}} = g_{mo} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right) \quad g_{mo} = 2I_{DSS} / V_P$$
- Representación de la transconductancia para $V_p = -2V$ e $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$



MEZCLADORES ACTIVOS: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO (II)

- Si se incluye una polarización de continua: V_{GS} : $v_{GS} = V_{GS} + V_{LO} \cos \omega_{LO} t$
- Con la transconductancia en el punto de trabajo: $g_{mQ} = g_{mo} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$
- Que resulta en: $g_m(t) = g_{mQ} + \frac{g_{mo}}{|V_P|} V_{LO} \cos \omega_{LO} t$
- Si se añade una señal de RF tal que $V_{RF} \ll V_{LO}$

$$i_D(t) = g_m(t) \cdot V_{RF} \cos \omega_{RF} t = g_{mQ} V_{RF} \cos \omega_{RF} t + \frac{g_{mo}}{|V_P|} V_{LO} \cos \omega_{LO} t \cdot V_{RF} \cos \omega_{RF} t$$



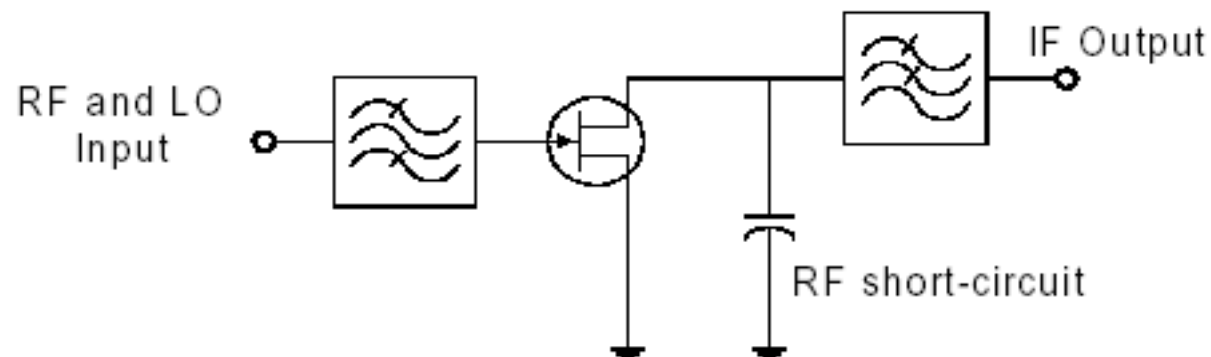
MEZCLADORES ACTIVOS: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO (III)

- Si la transconductancia es una función lineal y existe suficiente potencia para llevar al FET a su máxima transconductancia, esto supone polarizar al FET cerca de su voltaje de ruptura.
- La señal de LO determina la forma de la transconductancia.
 - Tiene que aplicarse a la puerta.
 - No puede aplicarse al drenador o al surtidor.
 - El drenador debe estar cortocircuito a LO y asegurar máxima ganancia de conversión y corriente de drenador.
 - Este cortocircuito en LO produce buenas condiciones de estabilidad.
- El FET es, ante todo, un dispositivo amplificador
 - Hay que eliminar el LO a la salida con un cortocircuito y/o con un filtro

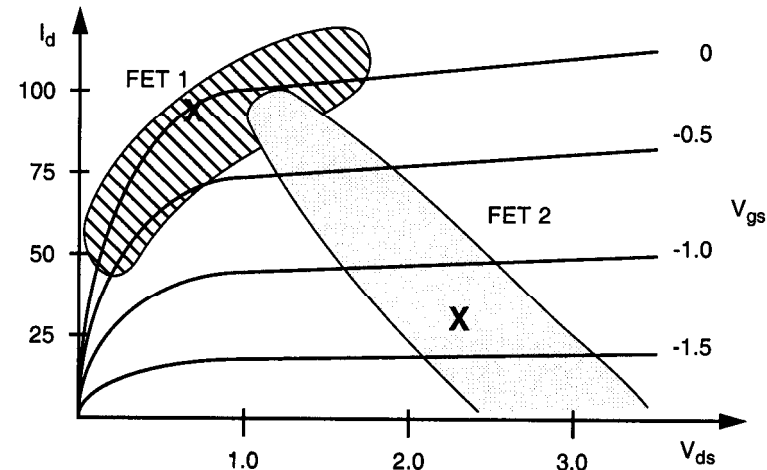
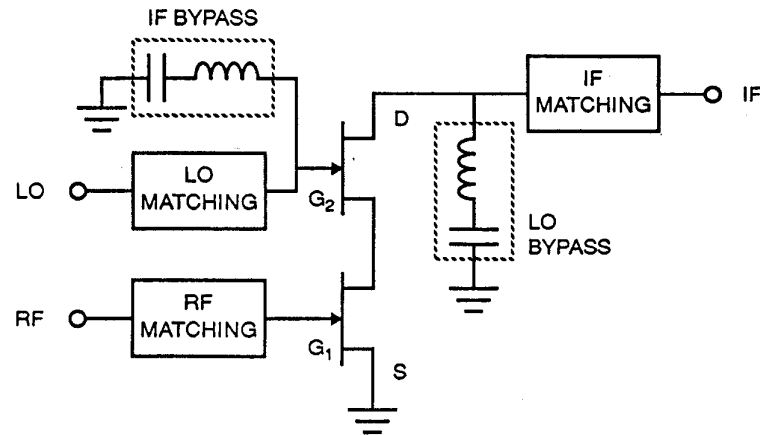


MEZCLADOR SIMPLE CON FET

- Necesidad de un diplexor para separar RF y LO.
- Características:
 - Ganancia de conversión.
 - Baja temperatura, bajo coste.
 - Pobre aislamiento entre las puertas de RF y LO
- Proceso diseño:
 - Polarizar la puerta del voltaje de ruptura.
 - Proporcionar suficiente LO para conseguir máxima transconductancia.
 - Cortocircuitar el drenador a LO
 - Filtro paso bajo para quedarnos con la frecuencia intermedia.
 - Diplexor para aislar RF y LO.



MEZCLADOR SIMPLE CON FET DE DOBLE PUERTA

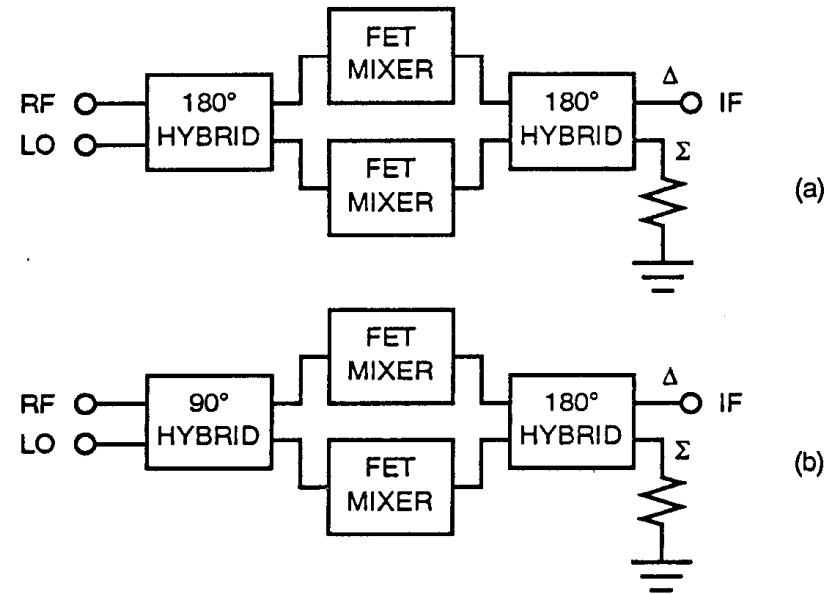


- Las señales de RF y LO se pueden aplicar a puertas separadas lo que mejora el aislamiento.
- Tiene menos ganancia de conversión y un poco más de ruido. La distorsión es menor.
- Principio de funcionamiento:
 - El transistor FET1 proporciona la función de mezclado. Es un FET inyectado por drenador con la señal de LO inyectada al transistor superior FET2.
 - Los dos FET operan como un transistor en cascodo.
 - La puerta del FET2 debe estar a tierra para FI
 - El filtro de FI del drenador debe cortocircuitar LO y, al estar cercano, RF.
 - Polarización:
 - El voltaje DC de la puerta 1 es alto mientras que el de la puerta 2 es tal para que conmute de on a off en cada ciclo de LO.



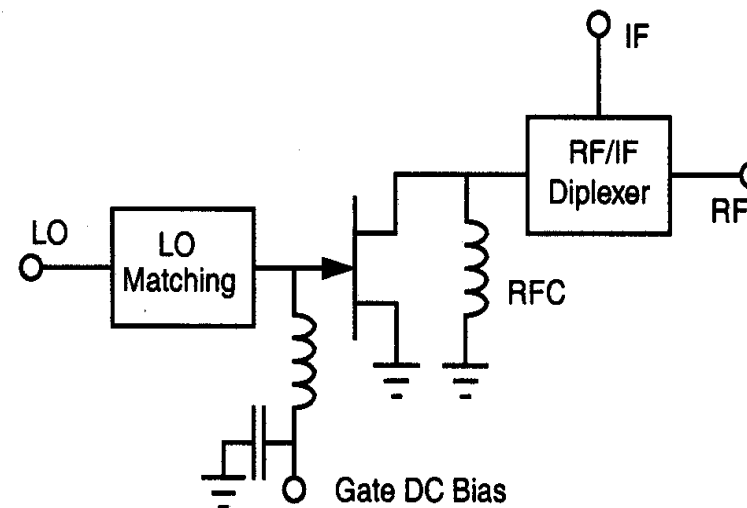
MEZCLADORES DOBLEMENTE BALANCEADO

- Pueden realizarse con transistores de una o de dos puertas.
 - Los de una puerta son preferibles para los simplemente balanceados.
 - Los de dos puertas para los doblemente balanceados.
- No pueden conducir en inversa por lo que necesitan un híbrido a la salida FI (mayor tamaño respecto al de los diodos)
- Características:
 - Aislamiento inherente en las puertas de RF y LO.
 - Rechazo al ruido AM de la LO
 - Ganancias de conversión prácticamente idénticas a los simples.

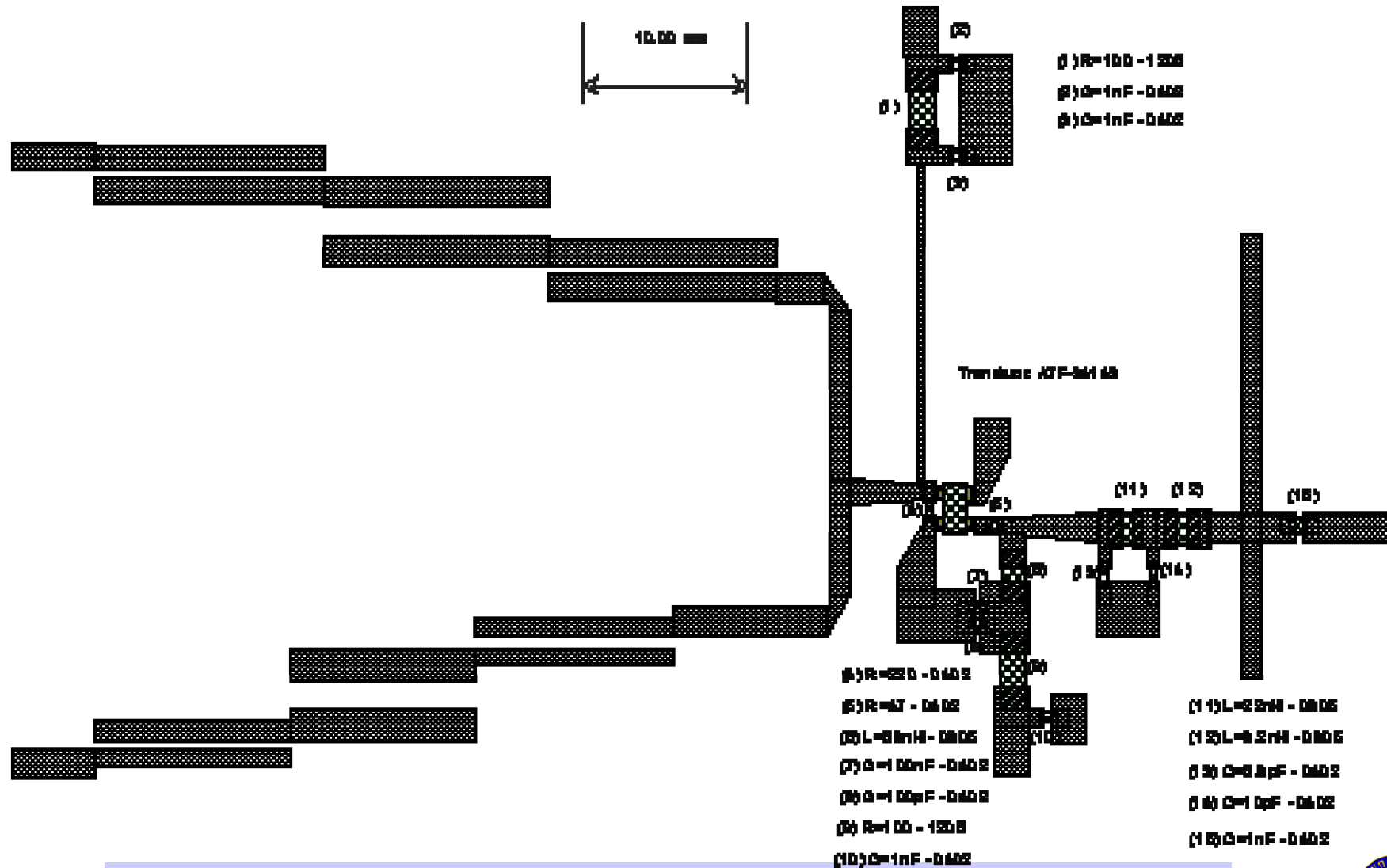


MEZCLADOR RESISTIVO CON FET

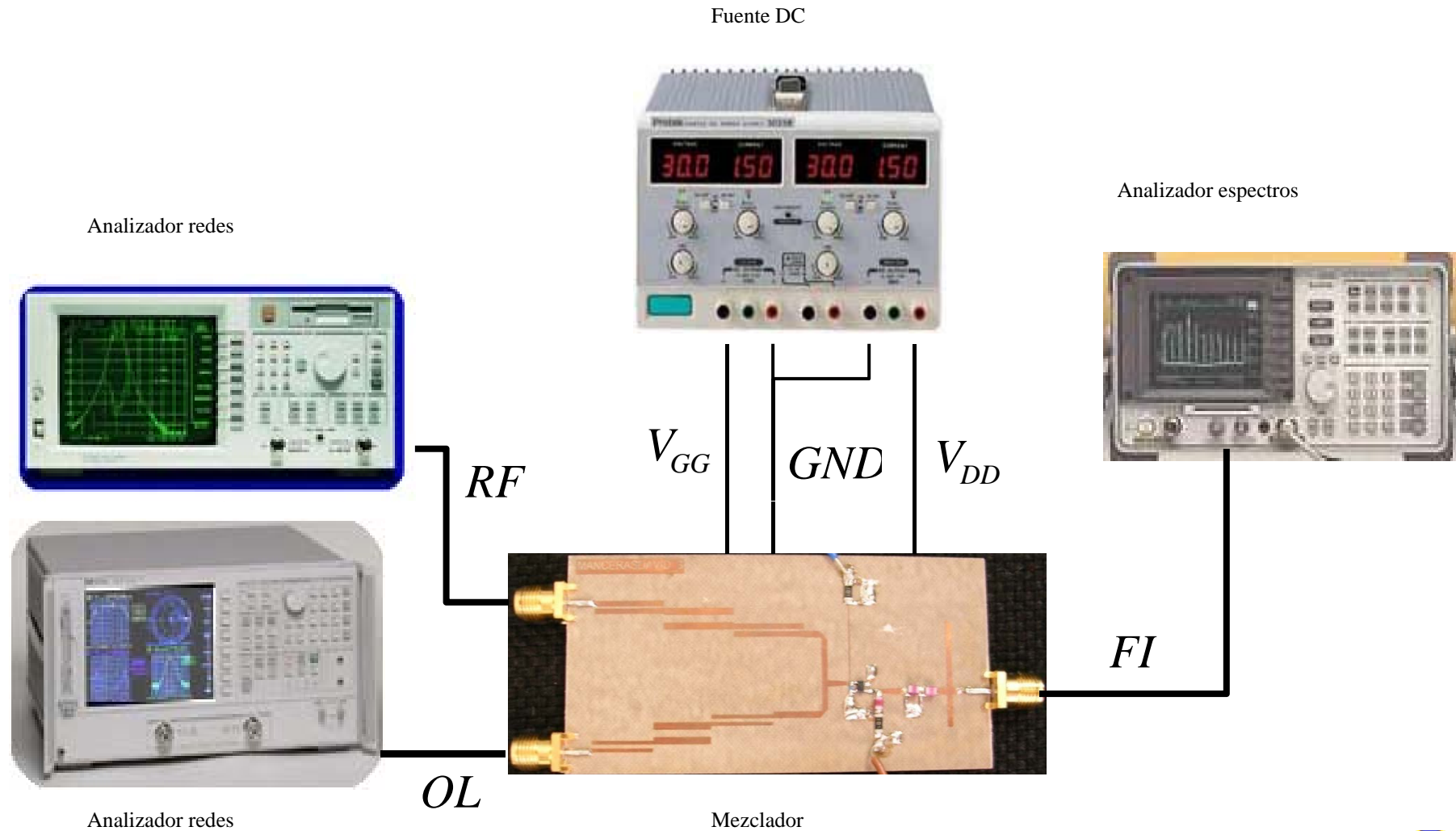
- Se basan en una variación de una resistencia, no en la variación temporal de una transconductancia.
- Válidos en aplicaciones con poca distorsión.
- Si se aplica un voltaje pequeño de polarización se puede conseguir una resistencia lineal.
- Principio de funcionamiento:
 - Aplicar la señal de LO a la puerta junto con la polarización.
 - Aplicar la señal de RF al drenador.
 - Filtrar la señal de FI en el drenador.
 - NO POLARIZAR EL DRENADOR.



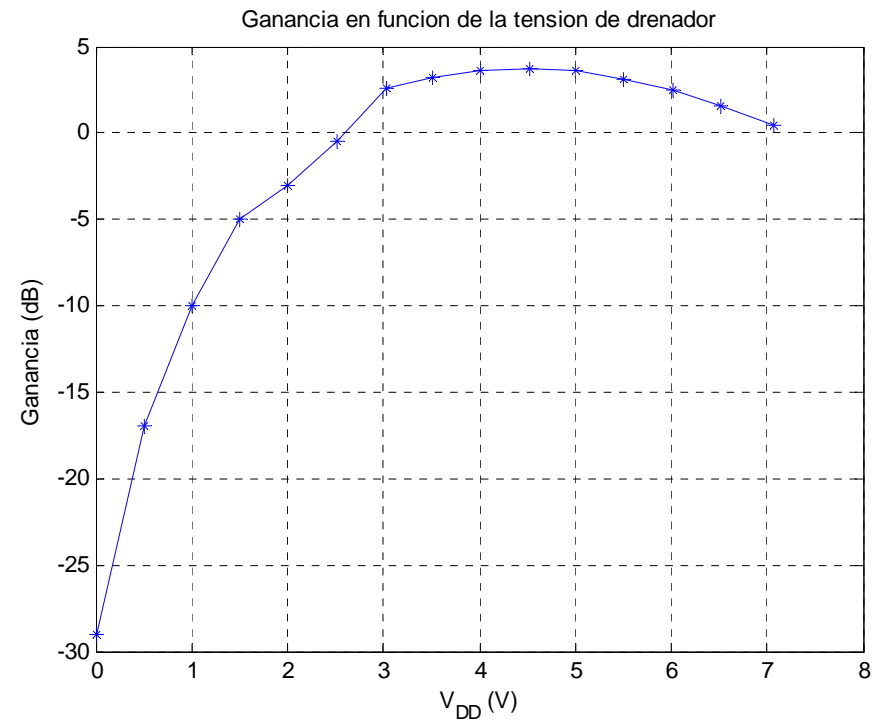
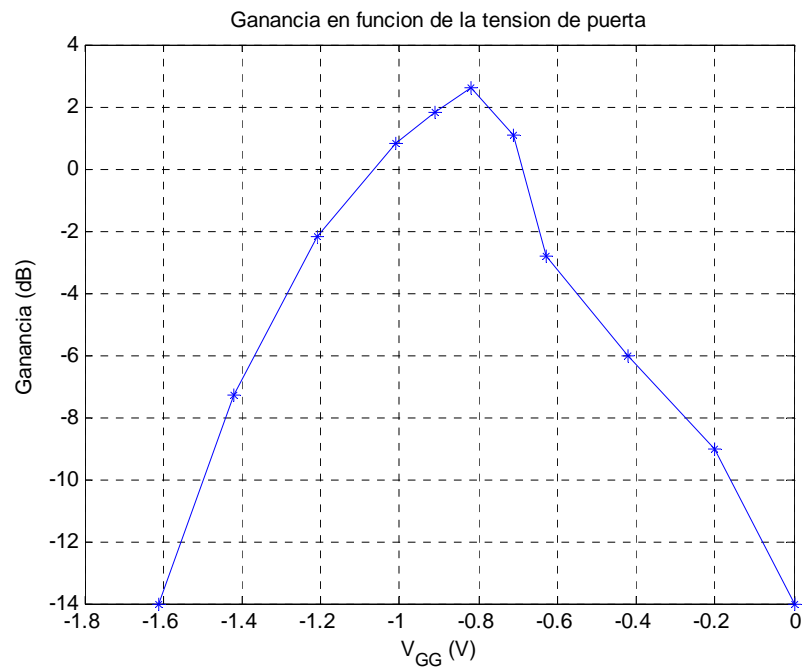
LAYOUT DE UN MEZCLADOR



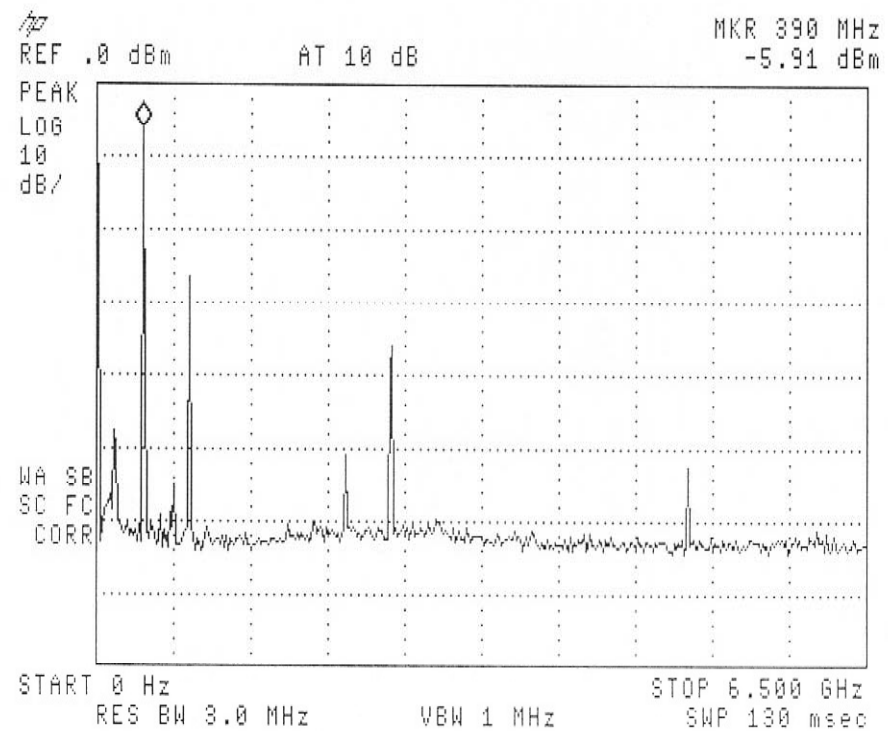
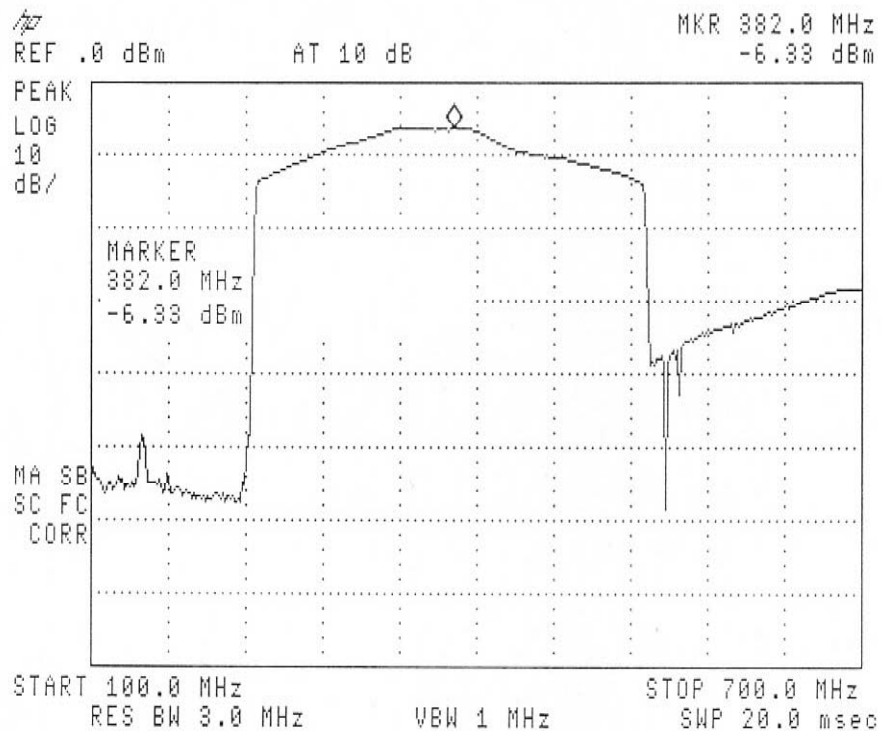
BANCO DE MEDIDA



MEDIDAS EN FUNCIÓN DE LA POLARIZACIÓN



MEDIDAS EN FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA DE RF



RESUMEN MEZCLADORES ACTIVOS

- A menor nivel de potencia de OL, menor es el nivel de potencia del resto de armónicos.
- Cuando se fija la potencia de OL a un valor determinado, la potencia de los armónicos del oscilador local (OL y $2 \cdot \text{OL}$) permanecen prácticamente constantes en la salida, independientemente de la potencia de RF.
- La atenuación que sufre la señal de OL es de unos 38 dB (sin contar lo que amplifique el FET esta frecuencia), luego el rechazo que proporciona el filtro paso bajo de FI y el stub al oscilador local es bastante buena. Por lo tanto, el aislamiento OL-FI es de 38 dB.
- Cuando la potencia de RF es elevada, la potencia del espurio $2 \cdot \text{FI}$ puede ser mayor que la potencia del espurio OL.
- Para el valor óptimo de la potencia de OL (+2 dBm) se obtiene la máxima ganancia de conversión y la máxima diferencia de potencia entre el tono de FI y el mayor espurio. En este caso se obtiene una ganancia de 4.2 dB y una diferencia de hasta 24.8 dB entre la frecuencia intermedia y el espurio de mayor potencia.
- Para tener un buen comportamiento no es aconsejable introducir una señal de RF por debajo de -20 dBm, porque a pesar de mantenerse la ganancia constante, la diferencia entre la FI y el espurio de mayor potencia será inferior a 20 dB.



TABLA COMPARATIVA

Frecuencia central de OL	2.492 GHz
Frecuencia central de RF	2.1 GHz
Frecuencia intermedia	392 MHz
Tensión óptima de puerta	-0.8 V
Tensión óptima de drenador	4.5 ± 1.5 V
Potencia óptima de OL	+2 dBm
Punto de compresión a 1 dB	-5 dBm
Ganancia de conversión	4 ± 0.2 dB
Aislamiento OL-RF	29 dB
Aislamiento OL-FI	38 dB



BIBLIOGRAFÍA

- S.A. Maas, “*Microwave Mixers*”, Artech House, 1993.
- S.A. Maas, “*The RF and Microwave Circuit Design Cookbook*”, Artech House, 1998.
- H.L. Krauss, C.W. Bostian, F.H. Raab, “*Solid State Radio Engineering*”, John Wiley & Sons, 1980.
- L. Devlin, “*Mixers*”, Plextek Communications Technology Consultants.
- Stephen A. Maas, “*Nonlinear Microwave and RF Circuits*”, Artech House, 2003.

