


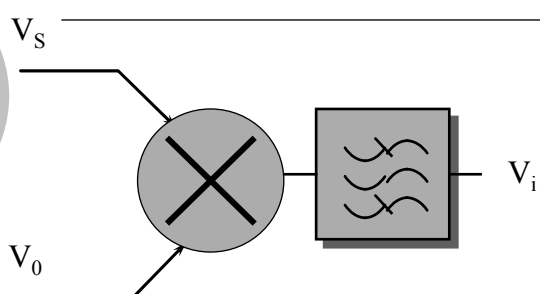

---

## Capítulo 6

### Mezcla y conversión de frecuencia



### Convertor de frecuencia ideal.

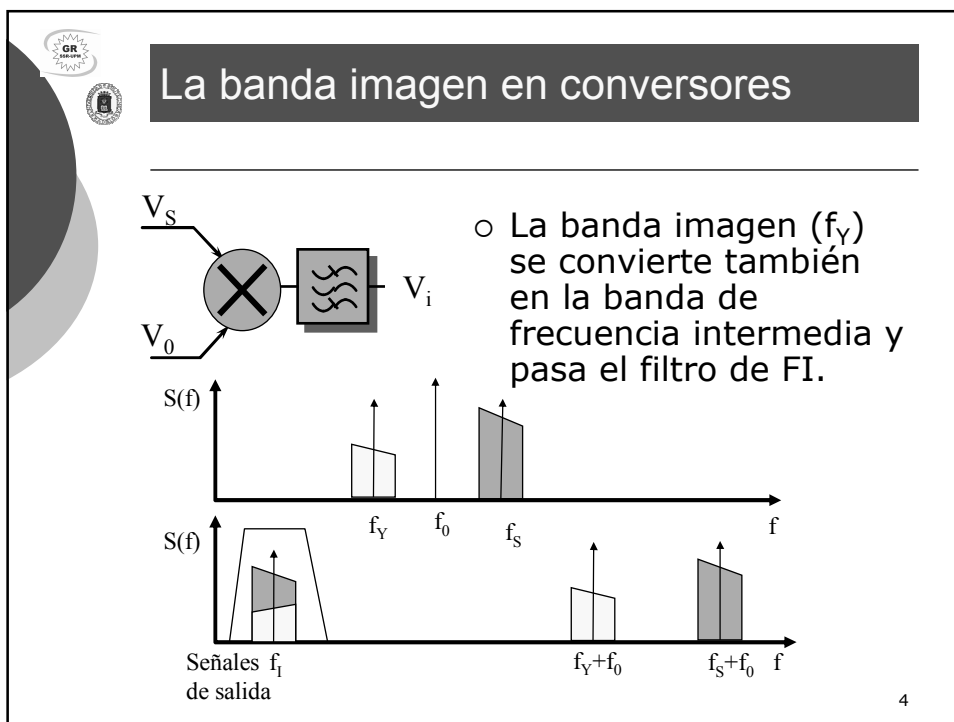
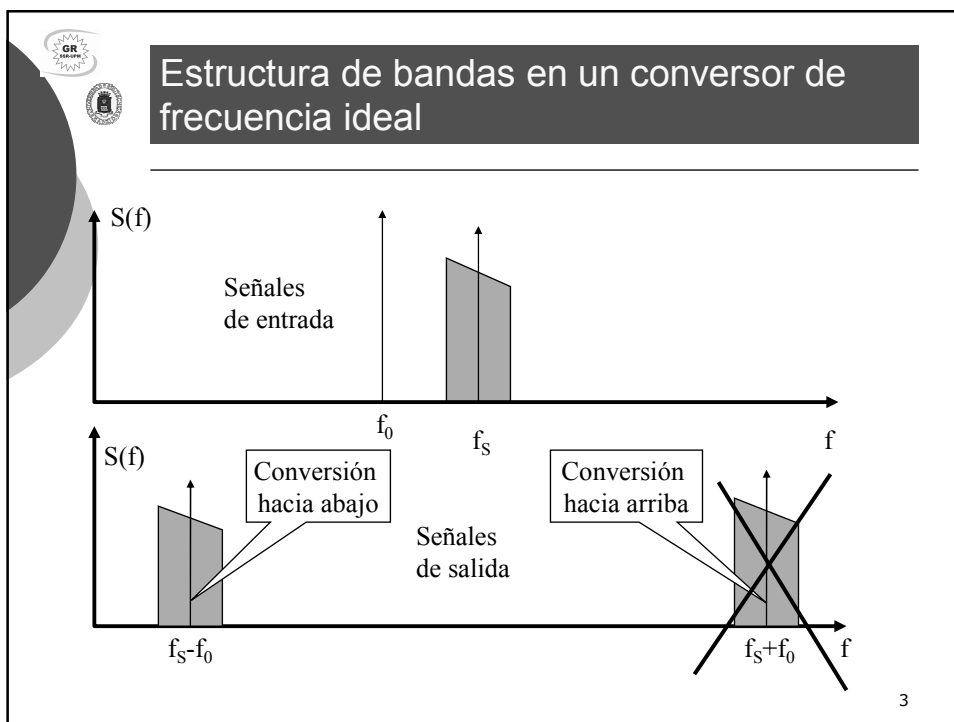


Está formado por un multiplicador ideal de señales y un filtro paso banda que selecciona una de las dos bandas de salida.

$$v_s = V_s x(t) \cos(\omega_s t + \phi(t))$$

$$v_0 = V_0 \cos(\omega_0 t)$$
~~$$v_i = \frac{KV_s V_0}{2} [x(t) \cos((\omega_s + \omega_0)t + \phi(t)) + x(t) \cos((\omega_s - \omega_0)t + \phi(t))]$$~~

2



### Dispositivo no lineal utilizado como mezclador de señales.

$$v_i = K_1(v_s + v_o) + K_2(v_s + v_o)^2 + K_3(v_s + v_o)^3 + \dots =$$

$$= \dots 2K_2v_s v_o + \dots$$

5

### Productos de mezcla no deseados

**No solo aparecen la suma y diferencia de frecuencias de entrada, sino la suma y diferencia de sus armónicos**

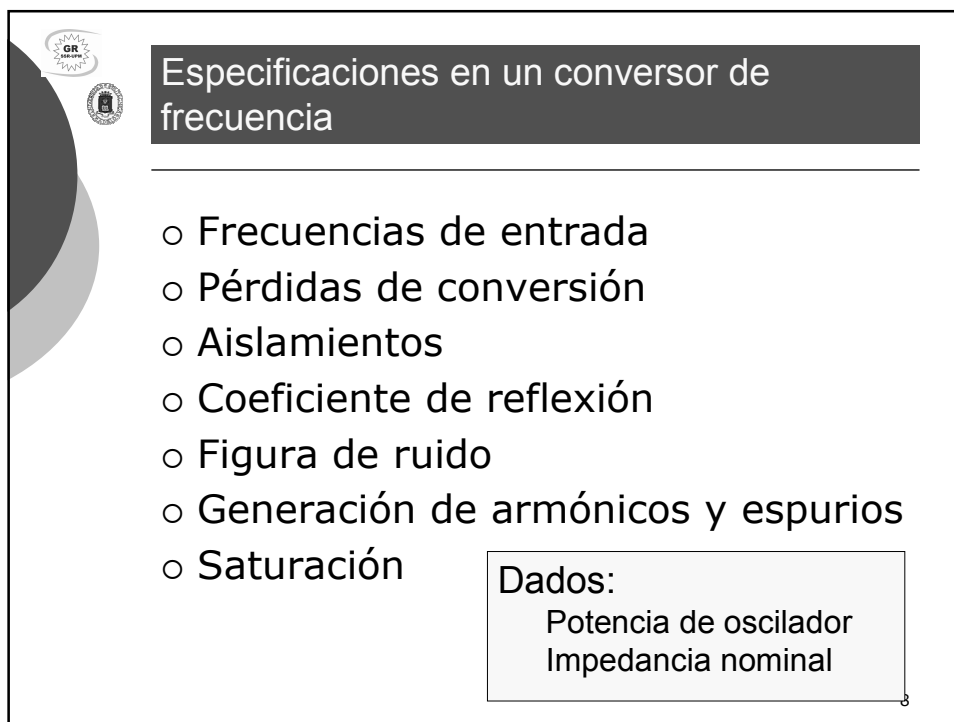
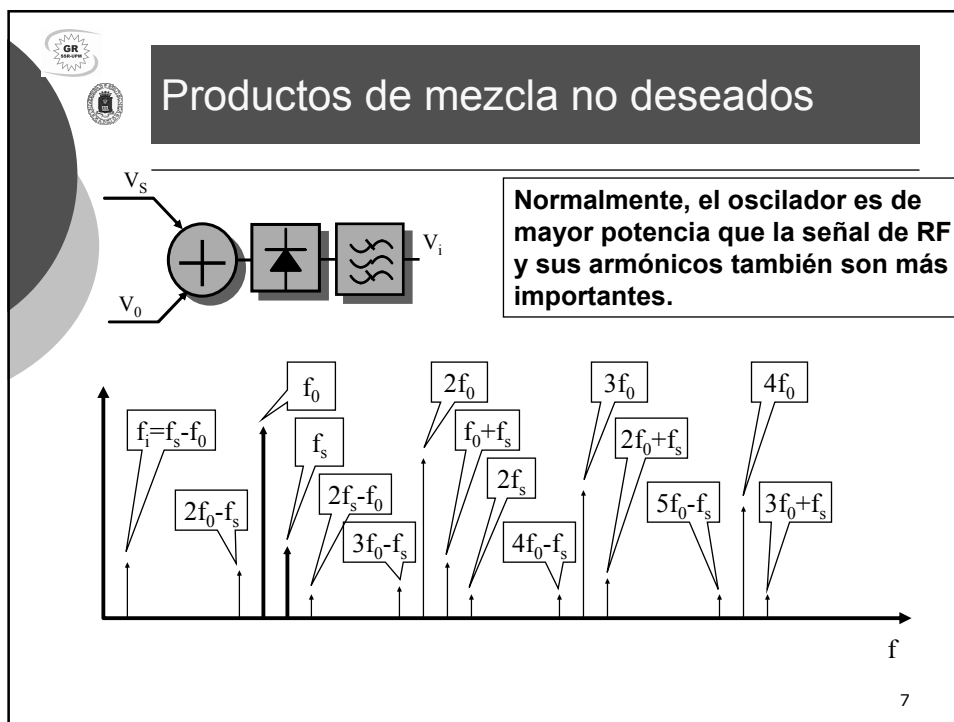
$$v_s = V_s \cos(\omega_s t)$$


$$v_o = V_o \cos(\omega_o t)$$

$$v_i = K_1(v_s + v_o) + K_2(v_s + v_o)^2 + K_3(v_s + v_o)^3 + \dots =$$

$$= \sum_n \sum_m A_{m,n} v_s^m v_o^n = \sum_n \sum_m C_{m,n} V_s^m V_o^n \cos[(m\omega_s \pm n\omega_o)t]$$

6





## Frecuencias de entrada / salida


○ Mezcladores de banda estrecha

- Utilizan filtros para separar las bandas.
- Las bandas no se solapan.
- Mezcladores de un solo componente.
- Aplicaciones de consumo o de muy alta frecuencia.

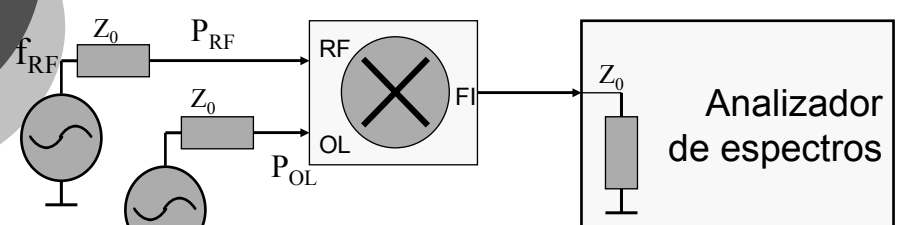
○ Mezcladores de banda ancha.

- Combinan varios componentes.
- Separan las bandas con circuitos híbridos.
- Son más complejos y con mejores prestaciones.
- Aplicaciones profesionales hasta microondas.

9



## Medida de un mezclador

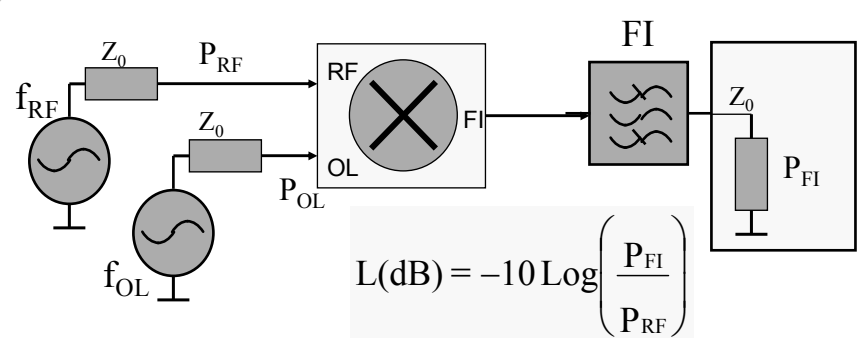


**Se basa en dos señales de entrada con frecuencia variable ( $f_{RF}$  y  $f_{OL}$ ).**  
**La potencia de señal es variable ( $P_{RF}$ ).**  
**La impedancia asociada a generador y carga es la nominal ( $Z_0$ )**  
**La potencia de oscilador es constante ( $P_{OL}$ ).**

10

## Pérdidas de conversión

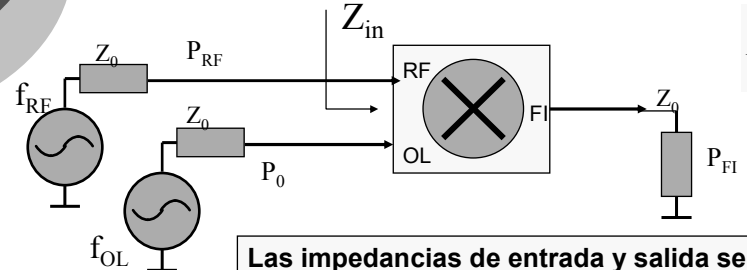
**Las pérdidas de conversión son independientes de la potencia de señal (zona lineal).  
Se determinan en función de la frecuencia de RF.  
A veces se da para varias potencias de oscilador.**



$$L(\text{dB}) = -10 \text{Log} \left( \frac{P_{\text{FI}}}{P_{\text{RF}}} \right)$$

11

## Impedancias de entrada, Pérdidas de Retorno y Relación de Onda Estacionaria



$$RL(\text{dB}) = -20 \text{Log} |\Gamma| \quad \text{donde} \quad \Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

$$ROE = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

**Las impedancias de entrada y salida se comparan con la nominal ( $Z_0$ ).  
Se suele definir las pérdidas de retorno (RL) o la ROE (VSWR) en función de la frecuencia de RF**

12

### Aislamiento OL/FI, OL/RF y RF/FI

**La atenuación que sufren las señales al pasar de una puerta a otra sin conversión determina el aislamiento.  $A_{OL/RF}$ ,  $A_{OL/FI}$  y  $A_{RF/FI}$**

$$A_{OL/RF}(\text{dB}) = -10 \text{Log} \left( \frac{P_{OL/RF}}{P_{OL}} \right)$$

$$A_{OL/FI}(\text{dB}) = -10 \text{Log} \left( \frac{P_{OL/FI}}{P_{OL}} \right)$$

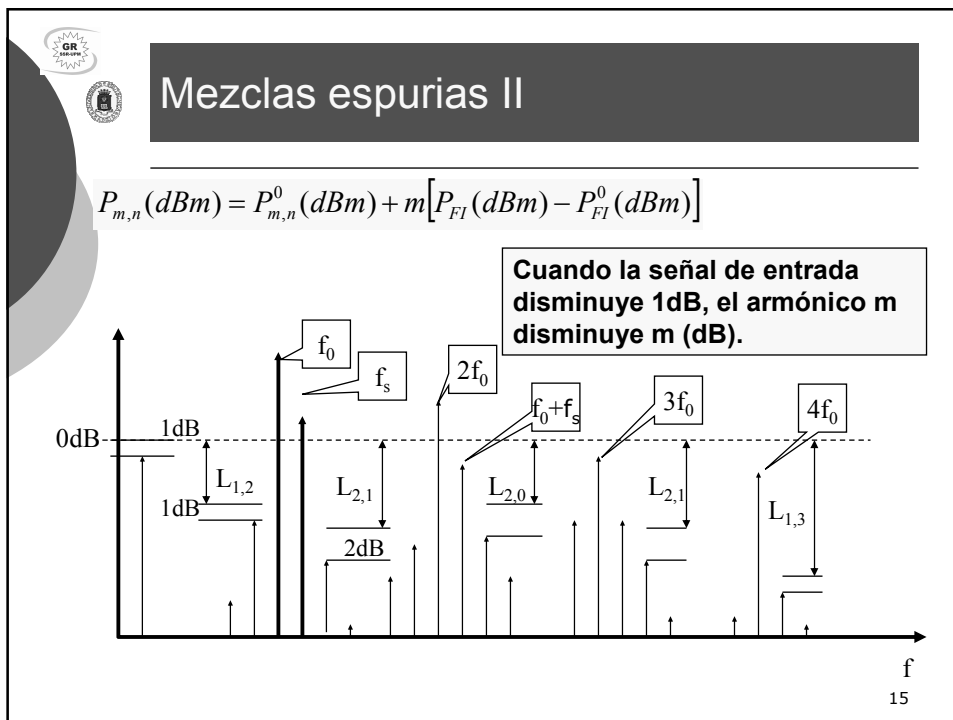
13

### Mezclas espurias I

Se especifica la atenuación  $L_{m,n}$  respecto a la mezcla principal.

$$P_{m,n}^0(\text{dBm}) = P_{FI}^0(\text{dBm}) - L_{m,n}(\text{dB})$$

14




### Ruido en convertidores de frecuencia

- El ruido de entrada también procede de las dos bandas:
  - Banda de señal
  - Banda imagen
- La potencia de ruido que genera el mezclador a su salida ( $P_n$ ) no depende del ruido que proceda de cada banda.

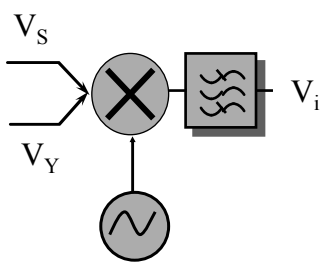
$$P = kB(T_S G_S + T_Y G_Y) + P_n$$

16





## Formas de definir el ruido en conversores




$$P = kB((T_S + T_{SSB})g_S + T_Y g_Y) =$$

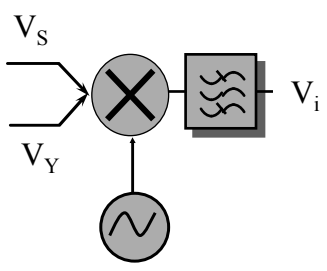
$$= kB((T_S + T_{DSB})g_S + (T_Y + T_{DSB})g_Y)$$

- ¿En que banda se inyecta el ruido "equivalente a la entrada"?
- Se define la temperatura en simple banda ( $T_{SSB}$ ) como la equivalente inyectada en la banda de señal.
- Se define como temperatura en doble banda ( $T_{DSB}$ ) como la equivalente inyectada en las dos bandas

17



## Formas de definir el ruido en conversores

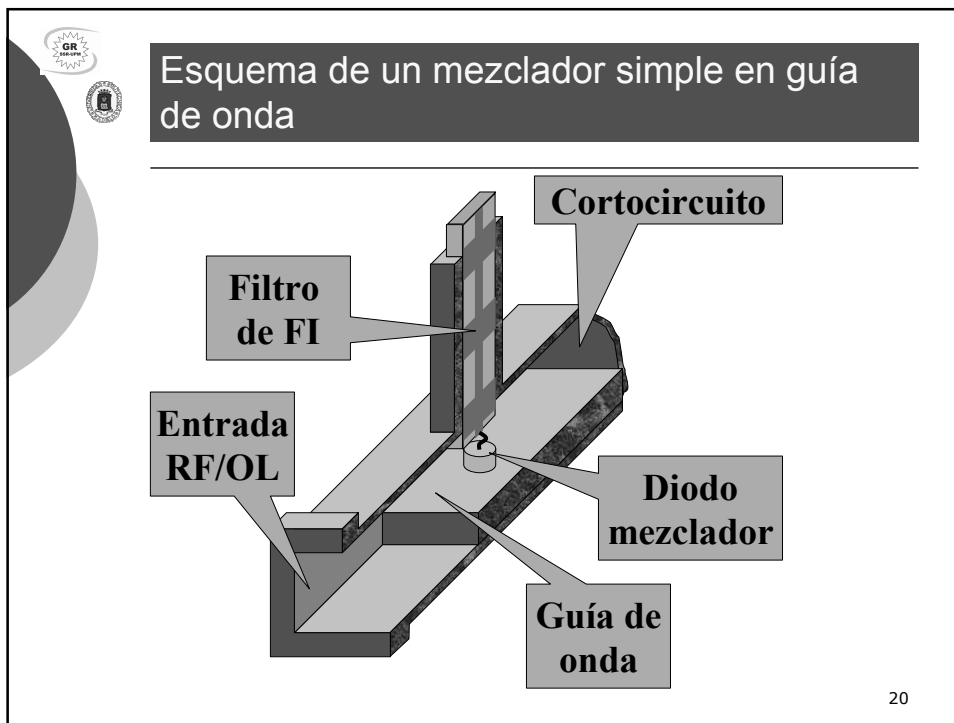
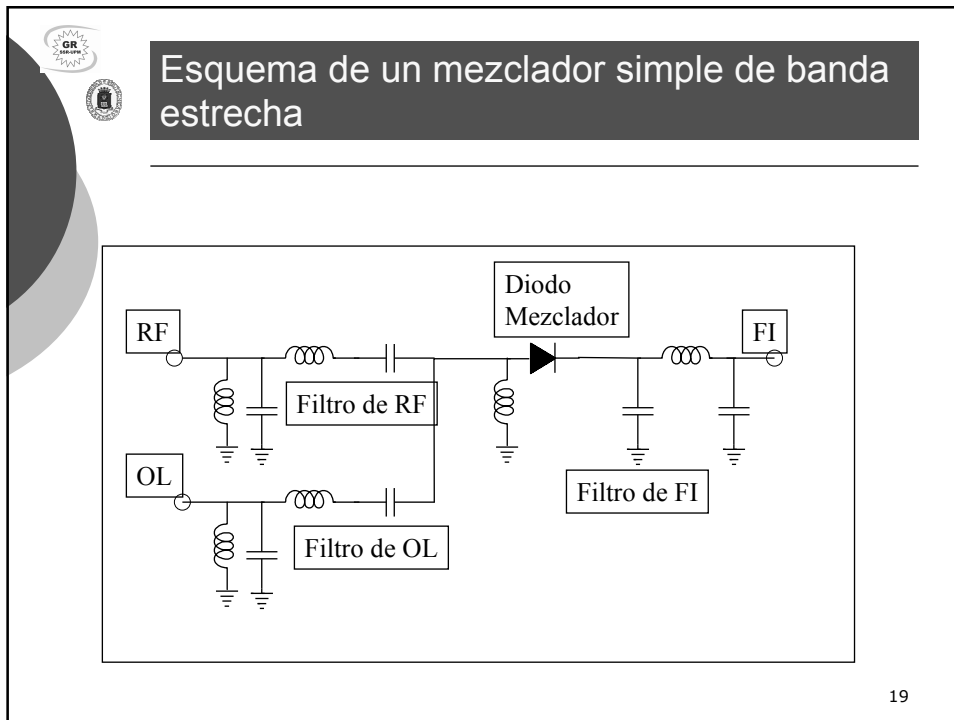



$$T_{SSB} = T_{DSB} \frac{g_S + g_Y}{g_S}$$

- Si las ganancias en señal e imagen son similares, ambas definiciones se relacionan por un factor dos.

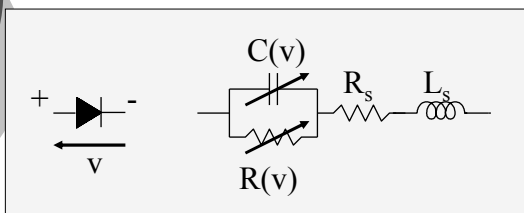
$$T_{SSB} = 2T_{DSB}$$

18





## Diodos Schottky




$$C(v) = \frac{C_0}{\left(1 - v/\phi_b\right)^{1/2}}$$

$$G(v) = \frac{1}{R(v)} = \frac{I_0}{\Delta V} 10^{\left(\frac{v}{\Delta V}\right)}$$

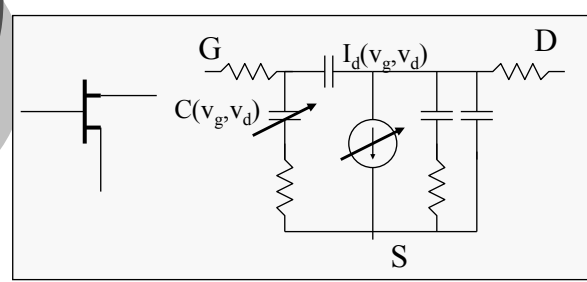
$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_0}$$

**Son diodos de unión metal-semiconductor (tipo n). El proceso de mezcla se centra en la resistencia variable. La capacidad y resistencia serie limitan la frecuencia útil.**

21





## Transistores MESFET



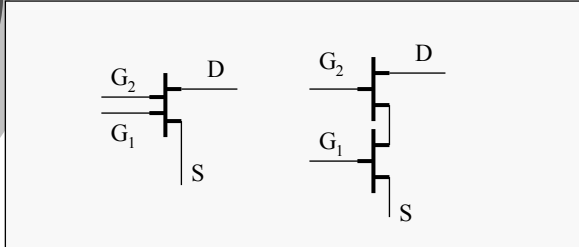
$$I_d(v_g, v_d) = \beta(v_g - v_t)^2 (1 - \lambda v_d) \text{Tanh}(\alpha v_d)$$

**Son FET de unión metal-semiconductor. El proceso de mezcla se centra en la transconductancia no lineal. Ofrecen ganancia de conversión.**

22






### Transistores MESFET de doble puerta.

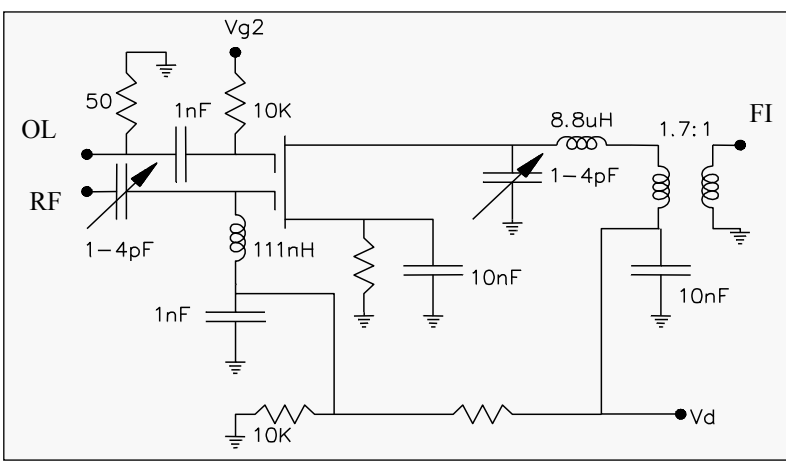


**El FET de doble puerta permite trabajar con entradas independientes de RF y OL. El proceso de mezcla se centra en la transconductancia no lineal. Ofrecen ganancia de conversión, buen aislamiento y baja potencia de OL.**

23

### Esquema de un mezclador con FET de doble puerta



24

Comparación entre mezcladores

<b>MEZCLADORES</b>	<b>Diodos Schottky</b>	<b>MESFET's</b>	<b>Bipolares</b>
Frecuencia máxima:	1000 GHz	50 GHz	200 MHz
Espúreos:	Bueno	Bueno	Malo
Ganancia:	-3 a -10 dB	5 a 10 dB	10 a 20 dB
Figura de ruido:	3 a 10 dB	6 a 10 dB	10 a 15 dB
Tecnología:	Si/AsGa	AsGa	Si
Aplicaciones:	Circuitos Híbridos de Microondas	1p: CI microondas 2p: componentes discretos	Circuitos integrados RF

25


Mezcladores equilibrados I

$$v_{i,2} = \sum_n \sum_m C_{m,n} V_s^m V_0^n \cos[(m\omega_s \pm n\omega_0)t]$$

$$v_i = v_{i,1} - v_{i,2} = \sqrt{2} \sum_n \sum_{m=1,3,\dots} C_{m,n} V_s^m V_0^n \cos[(m\omega_s \pm n\omega_0)t]$$

$$v_{i,1} = \sum_n \sum_m C_{m,n} (-V_s)^m V_0^n \cos[(m\omega_s \pm n\omega_0)t]$$

26



## Mezcladores equilibrados II

---

$$v_i = v_{i,1} - v_{i,2} = \sum_n \sum_m C_{m,n} V_s^{2m+1} V_0^n \cos[((2m+1)\omega_s \pm n\omega_0)t]$$


- Sólo hay potencias impares de la señal.
- Y múltiplos impares de su frecuencia

- No hay OL
- No hay armónicos de OL
- No hay armónicos pares de la señal
- No hay combinaciones de los anteriores

¿Si el equilibrio no es perfecto?

$$A = -10 \log \left( \frac{1 + R^2 - 2R \cos \phi}{2R} \right)$$

27

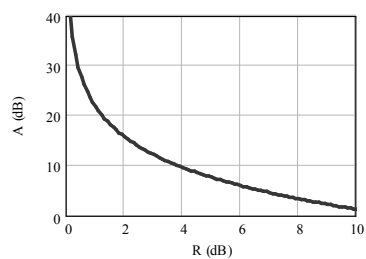
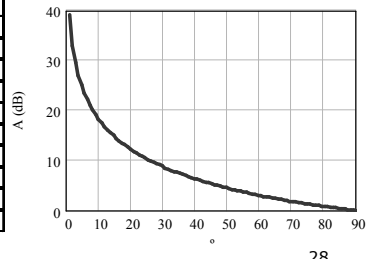


## Mezclador equilibrado III


---

$$\Delta A_0 = A_{0,\text{equilibrado}} - A_{0,\text{sencillo}} = -10 \log \left( \frac{1 + R^2 - 2R \cos \phi}{2R} \right)$$

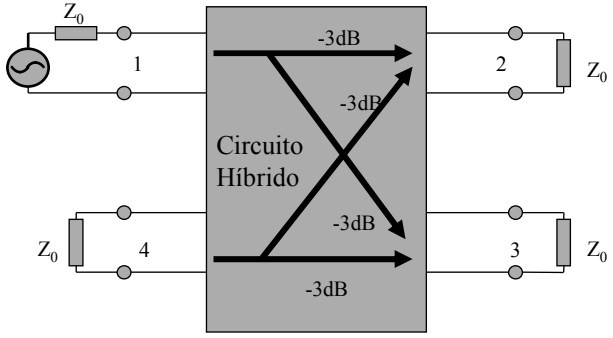
	R(dB)						
	0	0,5	1	2	3	5	10
0	27,8	21,8	15,7	12,2	7,7	1,3	
5	24,2	22,6	19,8	15,2	11,9	7,6	1,3
10	18,2	17,7	16,6	13,8	11,2	7,3	1,2
15	14,7	14,5	13,9	12,2	10,3	6,9	1,1
20	12,2	12,1	11,7	10,6	9,2	6,4	1,0
25	10,3	10,2	10,0	9,2	8,1	5,8	0,8
30	8,7	8,7	8,5	7,9	7,1	5,2	0,6
35	7,4	7,4	7,3	6,8	6,2	4,5	0,4
40	6,3	6,3	6,2	5,8	5,3	3,9	0,1

28




## Esquema de funciones de un circuito híbrido

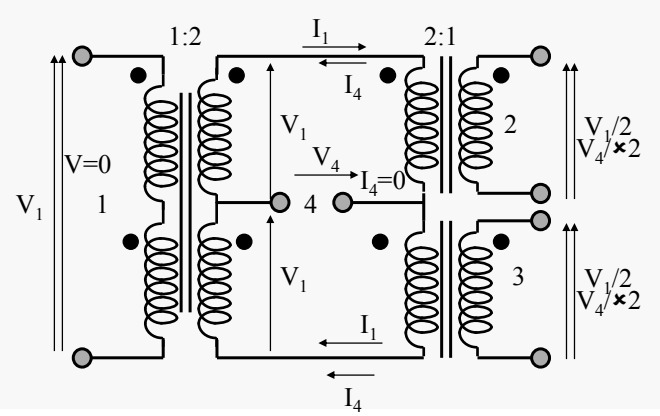


**Divide las señales de entrada (1 y 4) en partes iguales.  
 Combina en las puertas de salida las señales de entrada.  
 Aisla las puertas de entrada entre si.**


29



## Circuito híbrido con transformadores

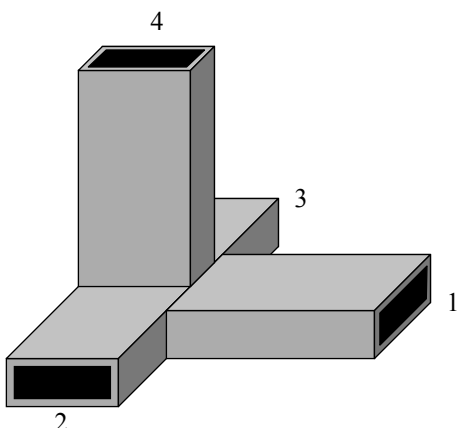


30




**Circuito híbrido en Guía de Onda.  
"T-mágica"**

---



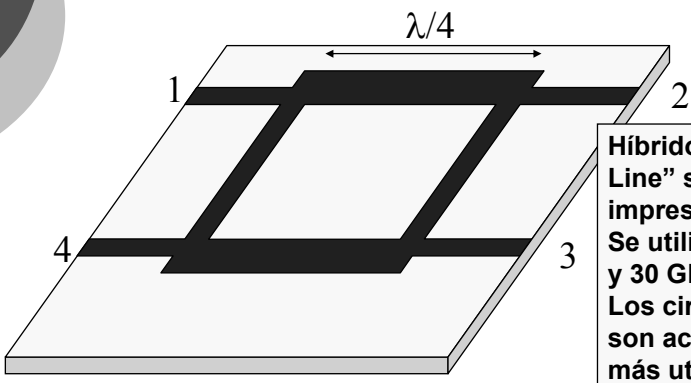
**Híbrido en guía de onda rectangular. Se utiliza en frecuencias superiores a 2GHz. Los circuitos planos ofrecen ventajas de tamaño, peso y precio.**

31



**Circuito híbrido en línea microtira. "Híbrido Branch-Line"**

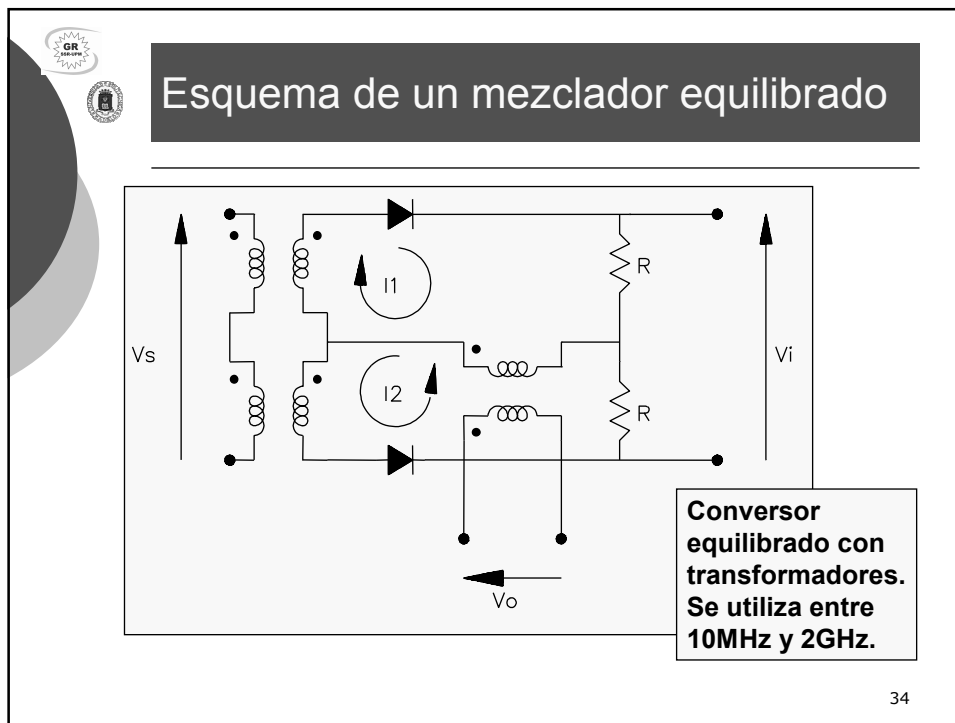
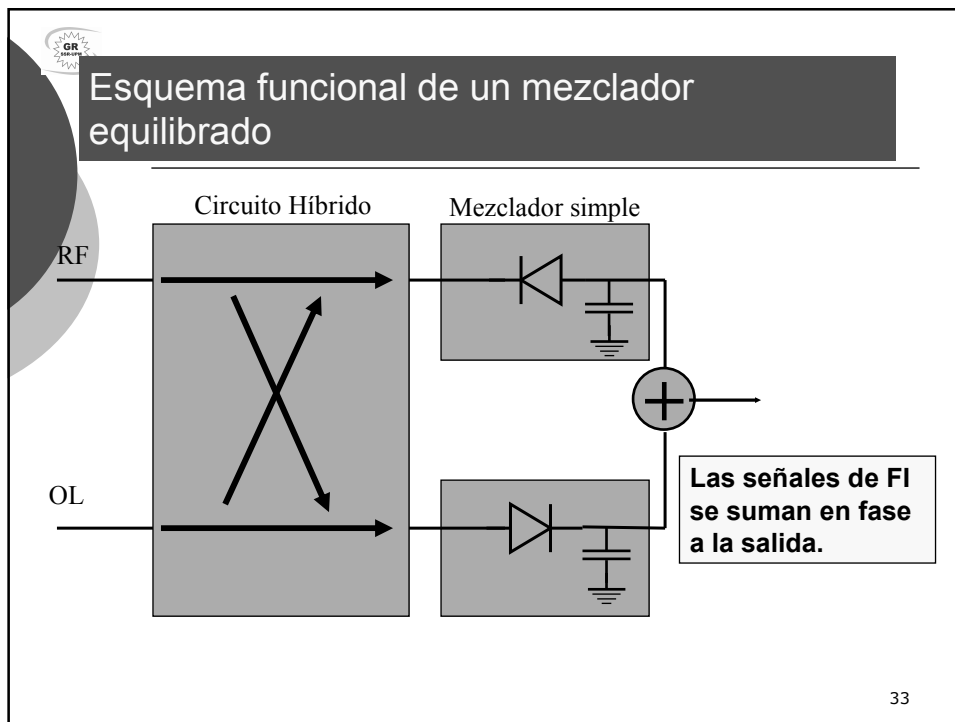
---



**Híbrido en "Branch-Line" sobre línea impresa. Se utiliza entre 1GHz y 30 GHz. Los circuitos planos son actualmente los más utilizados en microondas.**

32





**Esquema de un mezclador doblemente equilibrado con diodos**

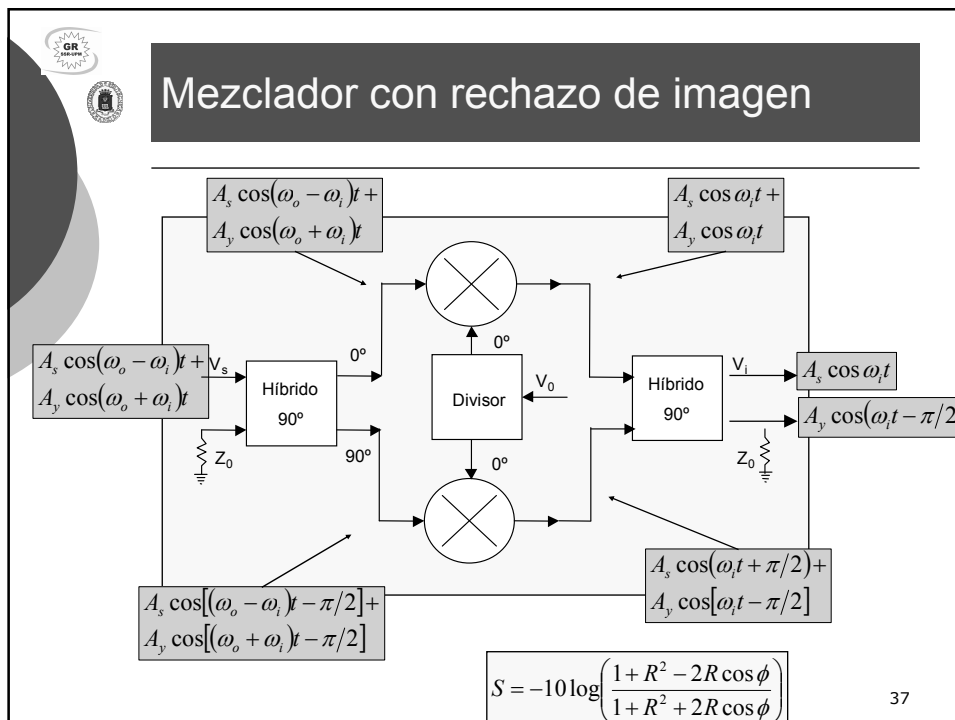
**Conversor doblemente equilibrado con transformadores. Se utiliza entre 10MHz y 2GHz. Consigue conversores de banda muy ancha.**

35

**Esquema de un mezclador doblemente equilibrado con BTs.**

**Conversor equilibrado con circuitos diferenciales. Se utiliza entre 0 y 100MHz. Muy utilizado en circuitos integrados de Si.**

36



### Preguntas de Test


**P6.1 Un mezclador doblemente equilibrado elimina las mezclas no deseadas de...**

- Los armónicos pares del OL con cualquier armónico de RF.
- Los armónicos pares del OL con los pares de RF
- Todos menos los armónicos impares de RF y OL
- Los armónicos pares de RF con cualquier armónico de OL.

**P6.2 Un convertor de frecuencia modifica la frecuencia portadora**

- Mediante un proceso no lineal que multiplica la frecuencia portadora por un factor.
- Mediante un proceso no lineal de mezcla con una señal de frecuencia fija.
- Mediante un circuito enganchado en fase que divide la frecuencia por un factor.
- Mediante un proceso lineal de amplificación y filtrado a la frecuencia deseada.

38



## Preguntas de Test


**P6.3 La ganancia de conversión de un mezclador se miden como un cociente de potencias.**

- La potencia de salida en FI dividida por la potencia de entrada en RF.
- La potencia de salida en FI dividida por la suma de las potencias de entrada.
- La potencia de salida en FI dividida por la potencia de OL.
- La potencia total de salida en todas las señales armónicas dividida por la potencia total de entrada de RF y OL.

**P6.4 Un mezclador doblemente equilibrado es un circuito que...**

- mezcla las señales de entrada solo cuando las dos tienen el mismo nivel.
- elimina las mezclas armónicas pares de las señales de entrada
- produce una señal a la salida con las dos bandas laterales iguales.
- limita la señal a la salida reduciendo la modulación de amplitud.

39



## Preguntas de Test


**P6.5 Un mezclador equilibrado mejora, respecto de un mezclador simple, las siguientes características:**

- Reduce las pérdidas de conversión en 3dB.
- Permite trabajar con niveles de señal más bajos.
- Permite trabajar con niveles de oscilador más bajos.
- Elimina las mezclas con armónicos pares del señal.

**P6.6 La conversión de frecuencia es un proceso...**

- que permite multiplicar la frecuencia de entrada por un factor fijo.
- que modifica la amplitud de las componentes espectrales de la señal inversamente proporcional a la frecuencia.
- No lineal que permite desplazar la frecuencia portadora una cantidad fija sin modificar la modulación.
- No lineal con el que se puede modular una portadora en FM.

40



## Preguntas de Test

---


**P6.7 El diodo de barrera Schottky se utiliza para la formación de circuitos mezcladores**

- Hasta 1000GHz por su baja capacidad de unión y reducido tamaño.
- En frecuencias bajas por su fácil integración en circuitos de Si.
- Hasta 1GHz donde está limitado por la capacidad de la unión.
- Sólo en conversores superiores por sus altas pérdidas en la conversión inferior.

**P6.8 Un mezclador equilibrado mejora, respecto de un mezclador simple, las siguientes características:**

- Reduce las pérdidas de conversión en 3dB.
- Permite reducir la potencia de oscilador local necesaria.
- Elimina el ruido del mezclador en la banda imagen.
- Aumenta el aislamiento entre las puertas de OL y FI

41



## Preguntas de Test

---


**P6.9 Un mezclador con rechazo de imagen, perfectamente balanceado, es un circuito que**

- Reduce las pérdidas de conversión en 3dB.
- Elimina la banda imagen en la etapa de RF
- Elimina la banda imagen de la etapa de FI
- Elimina la banda imagen en la etapa de OL

**P6.10 Los diodos varactores se emplean**

- Como conversores inferiores porque presentan ganancia de conversión
- Como conversores superiores porque atenúan la banda imagen
- Como conversores superiores porque presentan ganancia de conversión.
- En frecuencias bajas por su fácil integración en circuitos de Si.

42




Ejemplo: TFM-15

---

*Considere el mezclador de banda ancha de Mini-Circuits, modelo TFM-15, que posee las especificaciones siguientes, extraídas de las hojas del fabricante:*

Frecuencia (MHz)	RF/LO	10-3000
	IF	10-800
Potencia LO (nominal)		10 dBm
Impedancia nominal		50 ohm
ROE		2:1 máx.
Pérdidas de conversión		6.5 dB (8.5 máx)
Aislamiento	LO-RF	25 dB mín.
	LO-IF	20 dB mín.
Punto de compresión 1 dB (Potencia de entrada en RF)	P(1dB)	5 dBm

43



Ejemplo: TFM-15

---

**Ejemplo 6.1:** *El mezclador se utiliza en un receptor para trasladar la banda de recepción, centrada en 1500 MHz, a una frecuencia intermedia centrada en 70 MHz. La señal de entrada de RF es de 1500 MHz con un nivel de -50dBm y la de OL de 10dBm. Determine la frecuencia de la señal en la puerta de OL y los niveles a la salida en FI.*

**Ejemplo 6.2:** *Considere el cuadro de atenuación de armónicos correspondiente al mezclador de banda ancha del ejemplo anterior. Considere el espurio (3,5), que procede de la mezcla del tercer armónico de la señal de entrada con el quinto del oscilador. Determine su nivel a la salida para:*

- a) *Un nivel de 0dBm de la señal de entrada*
- b) *Un nivel de -5dBm de señal de entrada*

44

## Ejemplo: TFM 15

**E 6.1:** Calcule el nivel típico de potencia de oscilador local presente en las puertas de RF y FI para el mezclador TFM150 de Minicircuits, cuya hoja de características se presenta en el ejercicio 1 del capítulo. Realice los cálculos para un OL de 50 MHz y un OL de 1.5 GHz. Suponga que el OL trabaja a su potencia nominal.

**E 6.4:** Un conversor de frecuencia que utiliza el mezclador TFM15 de minicircuits, trabaja con una señal de RF centrada en 2140 MHz y debe generar una frecuencia intermedia de 760 MHz con un ancho de banda de 4 MHz.

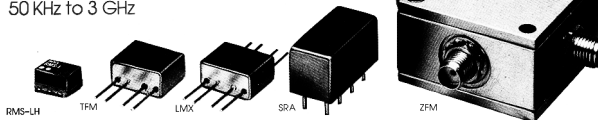
- a) Determine la frecuencia de oscilador local necesaria. Elija una de las dos posibles frecuencias.
- b) Si la potencia de oscilador es la nominal y la potencia de señal a la entrada es  $-50$  dBm, ¿cuál será el nivel típico de señal en frecuencia intermedia?
- c) ¿Cuál es el nivel de la frecuencia del oscilador en la salida de FI?

## Mezcladores comerciales Mini-Circuits

broadband high dynamic range

### Frequency Mixers


LEVEL 10 (+10 dBm LO, up to +5 dBm RF)  
50 KHz to 3 GHz



case style selection  
outline drawings see Table of Contents

MODEL NO.	FREQUENCY MHz		CONVERSION LOSS dB		LO-RF ISOLATION, dB			LO-IF ISOLATION, dB			PRICE \$	DISTRIBUTOR										
	LO/RF $f_L-f_U$	IF	Mid-Band m	Total Range	L	M	U	L	M	U												
NEW RMS case 11500	RMS-10A	2-500	DC-1000	5.7	7.0	6.0	8.0	58	45	44	25	30	20	55	40	40	25	28	17	8.95	•	•
	RMS-20H	5-1000	DC-1000	6.5	8.0	7.0	9.5	68	40	39	20	22	16	52	30	30	17	18	11	10.45	•	•
TFM case 813	TFM-15	10-3000	10-800	6.3	8.0	6.5	8.5	35	25	35	25	35	25	30	20	30	20	30	20	49.95	•	•
	TFM-150*	10-2000	DC-1000	6.0	8.0	6.5	8.0	32	25	35	25	35	25	33	20	30	20	30	20	26.45	•	•
LMX case 8650	LMX-123	10-3000	10-1000	7.5	8.0	7.5	8.5	35	25	35	20	30	15	35	25	30	25	30	20	69.95	•	•
	LMX-148	10-1500	DC-1500	6.0	7.0	6.0	10	45	40	35	30	25	20	40	35	35	25	20	12	29.95	•	•
SRA case A01	SRA-2CR	10-1000	5-500	6.0	7.5	7.0	8.0	50	40	40	30	30	20	40	25	30	18	25	15	17.95	•	•
	SRA-215	10-1500	10-500	6.0	7.5	7.0	9.0	25	20	35	25	30	20	25	20	35	25	25	15	28.95	•	•
ZFM case K18	ZFM-15	10-3000	10-800	6.3	8.0	6.5	8.5	35	25	35	25	35	25	30	20	30	20	30	20	89.95	•	•
	ZFM-150*	10-2000	DC-1000	6.0	8.0	6.5	8.0	32	25	35	25	35	20	33	20	30	20	25	20	69.95	•	•

L=low range ( $10 f_L$  to  $10 f_U$ )      M=mid range ( $10 f_L$  to  $f_U/2$ )      U=upper range ( $f_U/2$  to  $f_U$ )  
m=mid band ( $2 f_L$  to  $f_U/2$ )



Ejemplo: TFM 15

---

**harmonic attenuation**

Harmonics RF Order	RF CAL	MODEL TFM-15									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	31	17	42	32	48	47	52	65	59	
2	83	38	45	39	48	46	76	69	70	64	71
3	87	39	49	37	52	42	57	63	65	65	65
4	89	64	60	58	56	59	60	62	69	74	70
5	90	74	69	59	72	55	74	58	71	67	72
6	83	83	76	74	67	69	67	72	70	74	78
7	83	76	83	81	79	69	71	66	70	69	77
8	84	75	76	81	82	77	77	80	78	78	77
9	84	77	76	75	82	80	81	82	80	79	80
10	81	76	76	74	75	80	81	81	81	80	81

Harmonic LO Order

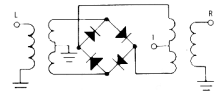
**NSN GUIDE**  
MCL NO. NSN  
ZFM-150 5895-01-217-0878

**NOTES:**

- NON-HERMETIC
- \* Below 10 MHz F, conversion loss increases up to 6dB higher as frequency decreases to DC.


1. For quality control procedures, environmental specifications, and Hi-Rel, MIL and TX description see Table of Contents.
2. Absolute Maximum Ratings, RF power 50 mW/level 10, 200 mW/level 13, except RMS-MH 150 mW. Peak IF current 40 mA, see Table of Contents.
3. For connector types and case mounting options, see case style outline drawings, see Table of Contents.
4. Prices and specifications subject to change without notice.

**schematic**



**MODEL: TFM-15**  
LO: +10 dBm 969.01 MHz.  
RF: 0 dBm 999.01 MHz.

47



Ejemplo: TFM 15

---

**E 6.5:** En un conversor de frecuencia que utiliza el mezclador TFM15 de Mini-Circuits, se conecta un oscilador de 10 dBm y 1200 MHz a la entrada de OL y una señal de 1010 MHz en la puerta de RF con una potencia de -10 dBm.

a) Determine la frecuencia de las señales obtenidas a la salida por combinación de las señales de entrada y sus armónicos de orden 5.

b) Determine los niveles de potencia a la salida y dibuje un esquema de lo que se vería en un analizador de espectros entre 0 y 800 MHz.

48