

# TEMA 7: AMPLIFICADORES

## Comunicaciones Inalámbricas

---

Marina Zapater

Primavera 2015

Departamento de Física Aplicada III, Universidad Complutense de Madrid



UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID

Este tema se compone de dos grandes bloques:

- Transmisores: bloques, tipos y parámetros básicos
- **Amplificadores:** Parámetros y tipos de amplificadores

Parámetros de un amplificador

Amplificadores sintonizados

Amplificadores multietapa

Amplificadores de banda ancha

Amplificadores de potencia

Amplificadores de potencia lineales (Clase A,B)

Amplificadores de potencia no lineales (Clase C,D,E)

Ejercicios

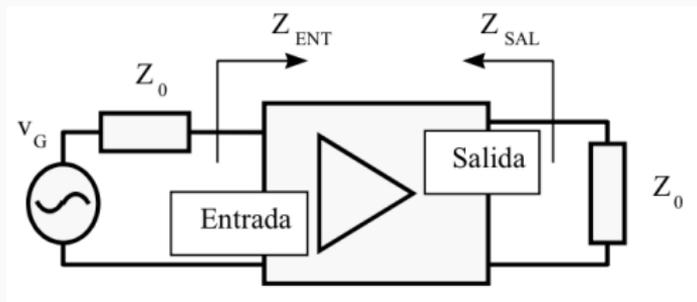
## PARÁMETROS DE UN AMPLIFICADOR

---

- Función de transferencia
  - Ganancia
  - Banda de trabajo
  - Tiempo de retardo
- Impedancias y reflexión
- Banda de trabajo
- Temperatura y figura de ruido
- Estabilidad
- Respuesta no lineal

## PARÁMETROS: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

- Para caracterizar el amplificador, necesitamos conocer los parámetros del generador y de la carga.
- En baja frecuencia ( $f < 100\text{MHz}$ ):
  - Se intenta que  $Z_g$  y  $Z_L$  afecten poco a la función de transferencia del amplificador  $\rightarrow$  hacemos  $Z_g$  pequeña y  $Z_L$  grande.
  - Cuando hablamos de ganancia, nos referimos a la ganancia en tensión. Suponemos  $|Z_g| \ll |Z_{ENT}|$ ,  $|Z_L| \gg |Z_{SAL}|$
  - Esto implica una gran desadaptación de potencia, pero gran estabilidad y control de la ganancia.



- **En alta frecuencia**, tenemos una ganancia más reducida y especificamos la ganancia como el cociente entre potencia de salida y entrada.
- Esta ganancia tiene en cuenta las posibles pérdidas de potencia por desadaptación de impedancias.
- A la hora de definir potencia podemos hablar de:
  - Potencia disponible del generador, o equivalente del cuadripolo, que es la máxima entregada
  - Potencia entregada, que es la real entregada.
- Las dos potencias anteriores coinciden si hay adaptación de impedancias → entregamos la potencia máxima

Podemos definir tres tipos de ganancia diferentes

- Ganancia de potencia:  $g_p = \frac{\text{Pot. entregada a la carga}(Z_L)}{\text{Pot. entregada al Amp}(Z_{ENT})} = g_p(Z_L)$ 
  - sólo tiene en cuenta desadaptación a la salida
- Ganancia disponible:  $g_d = \frac{\text{Pot. disponible salida}(Z_{SAL})}{\text{Pot. disp. generador}(Z_g)} = g_d(Z_g)$ 
  - sólo tiene en cuenta desadaptación a la entrada
- Ganancia de transducción:  $g_t = \frac{\text{Pot. entregada carga}(Z_L)}{\text{Pot. disp. generador}(Z_g)} = g_t(Z_g, Z_L)$ 
  - es la que puede medirse, y tiene en cuenta desadaptación en entrada y salida

- Las tres formas de definir la ganancia coinciden si tenemos adaptación de impedancias
- En cuadripolos en cascada, estamos acostumbrados a definir la ganancia total como el producto de ganancias
- Lo anterior se cumple para la ganancia en tensión, la ganancia en potencia y la disponible, pero **no** para la ganancia de transducción, porque contaríamos dos veces la desadaptación.

- Ganancia y reflexión se suelen dar como un único valor para toda la banda (aunque sean función de la frecuencia) → y se dan también los parámetros de variación de la función de transferencia:
  1. **Rizado de ganancia**: variación de la ganancia dentro de la banda (en dB)
  2. **Fase de transferencia**: para evitar la distorsión lineal deberíamos tener una fase lineal con la frecuencia que dé un retardo constante.
  3. **Tiempo de retardo**: para especificar la respuesta en fase, lo normal es dar el retardo medio y su máxima variación en la banda deseada:  $\tau(\omega) = \tau_0 + \Delta\tau(\omega)$

- En general, para baja frecuencia se utilizan indistintamente impedancias nominales ( $Z_0$ ) de 50, 75 o 300 $\Omega$ .
- En frecuencias altas, se toma como valor generalizado que 50 $\Omega$
- En el amplificador, se pueden definir los coeficientes de reflexión a la entrada y a la salida como:

$$\Gamma_{ENT} = \frac{Z_{ENT} - Z_0}{Z_{ENT} + Z_0}, \quad \Gamma_{SAL} = \frac{Z_{SAL} - Z_0}{Z_{SAL} + Z_0}$$

- Si existe una adaptación perfecta, tendremos  $\Gamma = 0$  y si existe reflexión total  $|\Gamma| = 1$

## ■ Pérdidas de retorno (Return Loss - RL):

$$RL = 20 \log |\Gamma|$$

- $\Gamma$  es un parámetro complejo, trabajamos con su módulo como cota superior
- RL representa la atenuación sufrida por la onda sobre la línea de transmisión de impedancia característica  $Z_0$  en su reflexión a la entrada o salida del amplificador

## ■ Relación de Onda Estacionaria (ROE):

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

- representa el cociente entre máximos y mínimos de tensión en la línea por la existencia de la onda incidente y reflejada.
- si  $ROE = 1$  tenemos una adaptación perfecta, si es infinito, la reflexión es total.

- La desadaptación produce una pérdida de potencia transmitida, que puede expresarse como una pérdida por desadaptación:

$$L_{ENT}(dB) = -10\log\left(1 - \left|\frac{Z_{ENT} - Z_g^*}{Z_{ENT} + Z_g^*}\right|^2\right)$$

$$L_{SAL}(dB) = -10\log\left(1 - \left|\frac{Z_{SAL} - Z_L^*}{Z_{SAL} + Z_L^*}\right|^2\right)$$

- Al definir función de transferencia o ganancia, las funciones resultantes dependen de la frecuencia.
- En un amplificador, la ganancia debe ser constante e independiente de la frecuencia en la banda de trabajo.
- La banda de trabajo es el margen de frecuencias en que el amplificador cumple especificaciones:

$$B = f_2 - f_1, \quad f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

- En función del ancho de banda relativo ( $B/f_0$ ) definiremos 3 tipos de amplificadores:
  - Amplificadores sintonizados, o de banda estrecha ( $B/f_0 < 0.3$ ): formados por etapas amplificadoras en cascada, uno o varios transistores unidos por redes LC
  - Amplificadores de banda ancha ( $0.3 < B/f_0 < 0.7$ ) amplificadores en cascada con dispositivos realimentados para compensar variaciones de ganancia con frecuencia. Usan redes disipativas para tener mejor ancho de banda.
  - Amplificadores de banda ultra ancha ( $f_2 > 2f_1$ ) estructuras independientes de la frecuencia como amplificadores distribuidos (para RF y microondas).

- En un amplificador, utilizaremos las expresiones para la temperatura y figura de ruido de un cuadripolo lineal (Tema de Distorsión y Ruido)
- La figura de ruido dependerá del propio amplificador y del generador, de la forma:

$$f = f_{min} + \frac{1}{R_n} \frac{(R_g - R_{opt})^2 + (X_g - X_{opt})^2}{R_g}$$

donde:

- $f_{min}$  es la figura de ruido mínima
  - $Z_{opt} = R_{opt} + jX_{opt}$  es la impedancia de ruido mínimo
  - $R_n$  es la resistencia de ruido del amplificador
- El fabricante nos dará directamente la figura de ruido, que suele estar entre 3 y 6 dB:

$$T_e = T_0(f - 1)$$

- En el caso de un *Low Noise Amplifier*(LNA), tendremos temperaturas de ruido de 5-10K.
- La potencia total de ruido medida a la salida y generada en el amplificador será:

$$P_N = kT_e(\omega_0)Bg_d(\omega_0)$$

donde:

- $g_d$  es la ganancia disponible
- $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

- La estabilidad mide la tendencia a oscilar debido a la existencia de realimentaciones internas de los dispositivos amplificadores o circuitos realimentados.
  - Un dispositivo será **estable** si al cargarlo con la impedancia nominal  $Z_0$  no oscila
  - Un dispositivo será **incondicionalmente estable** si cargado con cualquier impedancia  $Z_g, Z_L$  con parte real mayor o igual a cero no oscila.

- En temas anteriores, hemos visto que el comportamiento no lineal del amplificador se puede modelar como una respuesta polinómica.
- Los parámetros no lineales de interés son:
  - Punto de compresión a 1dB: potencia de salida para una pérdida de ganancia de 1dB.
  - Punto de intermodulación de tercer orden (PI3) para dos tonos iguales.
  - Nivel de armónicos, que indica los niveles de potencia absoluta o relativa a la potencia de salida (en dB) para los diversos armónicos.

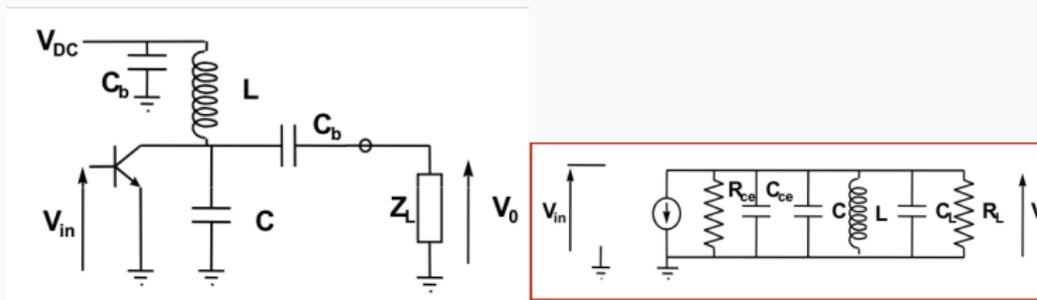
- Amplificadores sintonizados
  - Amplificadores de bajo ruido
  - Baja intermodulación
  - Amplificadores de banda estrecha (filtros)
- Amplificadores multietapa
  - amplificadores sintonizados en cascada
- Amplificadores de banda ancha
  - Realimentados
  - Distribuidos
- Amplificadores de potencia
  - Suelen ser sintonizados
  - Pueden ser lineales (A,B) o no lineales (C,D,E)

# AMPLIFICADORES SINTONIZADOS

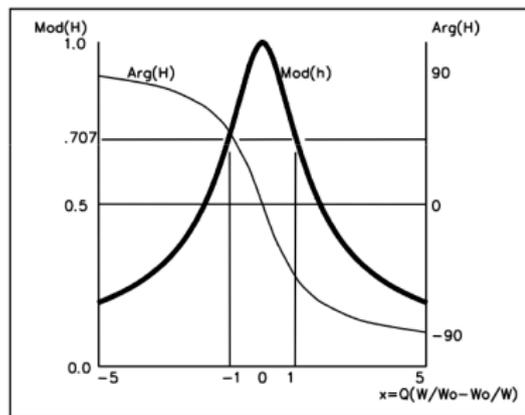
---

- Son amplificadores de banda estrecha ( $B/f_0 < 0.3$ ), y son los más usados.
- Están formados por transistores unidos entre sí mediante redes de adaptación y filtrado, formadas por elementos pasivos reactivos.

Amplificador de sintonía simple y circuito equivalente:



- Circuito de sintonía simple:



*Función de transferencia*

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{g_m}{g + j\omega C_r + 1/j\omega L} = \frac{g_m/g}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

$$Q = \frac{\omega_0 C_r}{g} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_r}}$$

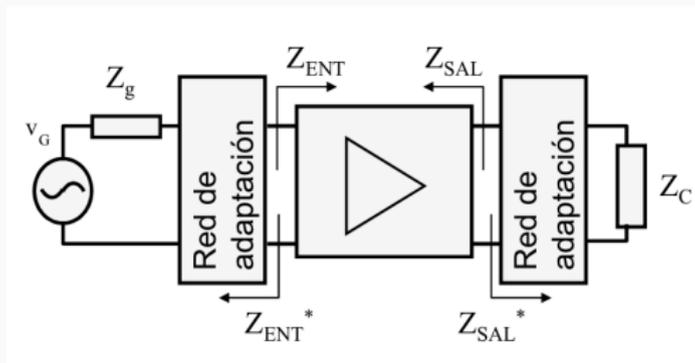
$$C_T = C_{ce} + C + C_L$$

$$g = \frac{1}{R_{ce}} + \frac{1}{R_L}$$

5

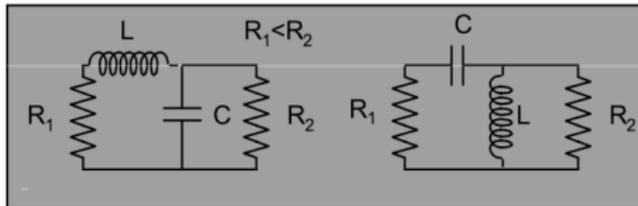
# REDES DE ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS

- En general, la impedancia que presenta un transistor a la entrada y salida no está adaptada a la carga
- Las redes de adaptación deben presentar la impedancia conjugada
  - Adaptación en parte real → máxima transferencia de potencia
  - Adaptación en parte imaginaria → sintonía (adaptación a frecuencia central de diseño)
- Se usan redes adaptadas sin pérdidas formadas por elementos no disipativos.



## EJEMPLO: RED DE SINTONÍA SIMPLE

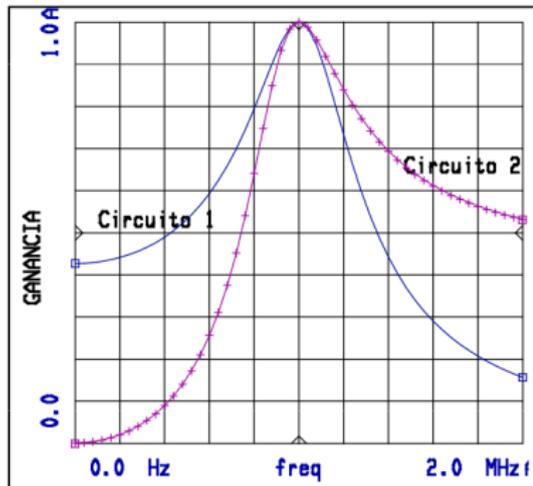
Realice la adaptación de una impedancia de  $R_1 = 50\Omega$  a  $R_2 = 1000\Omega$  mediante: una red en L paso y una red en L paso alto, ajustando la sintonía a una frecuencia central de  $f_0 = 1\text{MHz}$   
Calcule los valores de L, C y el ancho de banda a 3dB.



*Red de adaptación LC*

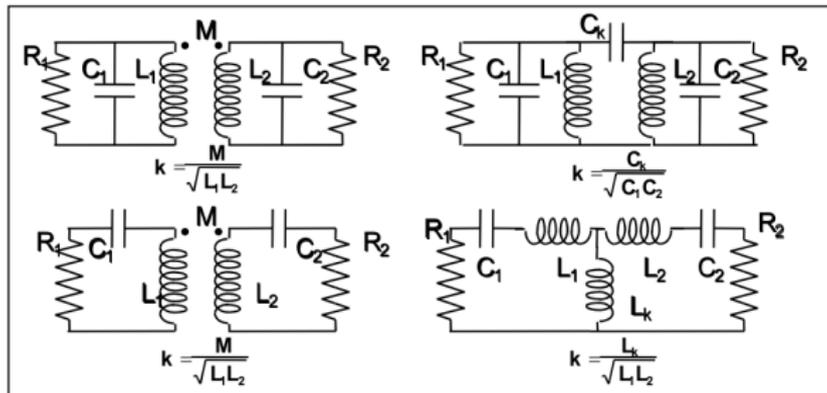
# EJEMPLO: RED DE SINTONÍA SIMPLE (SOLUCIÓN)

Forma de la respuesta en frecuencia de cada red:



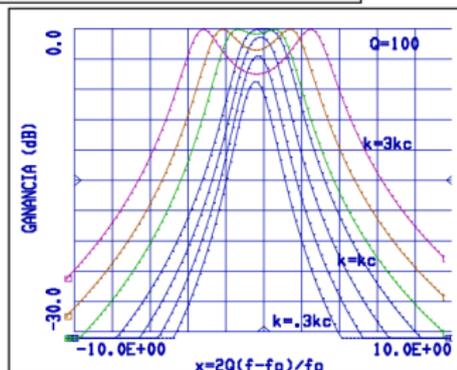
*Respuesta en frecuencia*

# CIRCUITOS DE DOBLE SINTONÍA



*Circuitos de  
doble sintonía*

*Respuesta de un circuito  
de doble sintonía*



## AMPLIFICADORES MULTIETAPA

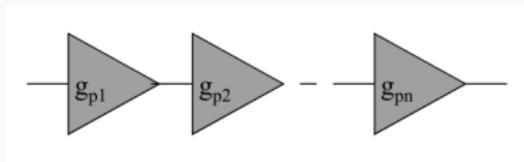
---

- Varias etapas conectadas en cascada y formadas cada una por un componente activo y una red de adaptación
- Como hay adaptación, la ganancia del conjunto será el producto de ganancias:

$$g_p(f) = g_{p1}(f) \cdot g_{p2}(f) \dots g_{pn}(f) = \frac{g_{p1}(f_{01})}{1+x_1^2} \cdot \frac{g_{p2}(f_{02})}{1+x_2^2} \dots \frac{g_{pn}(f_{0n})}{1+x_n^2}$$

donde  $x_i = Q_i \left( \frac{f}{f_{0i}} - \frac{f_{0i}}{f} \right)$

- Y tenemos como variables de diseño:
  - La ganancia de los amplificadores
  - La frecuencia de sintonía  $f_{0i}$
  - El factor de calidad  $Q_i$



- Cada etapa influye en las siguientes
- Pero si los transistores tienen una realimentación pequeña, son incondicionalmente estables, tenemos impedancias casi constantes y consideramos independientemente el diseño de cada etapa.
- Tenemos dos escenarios típicos:
  - Amplificador de sintonía fija
  - Amplificador de sintonía escalonada

- Sintonizamos todas las etapas a la misma frecuencia central  
 $f_{oi} = f_0$  y  $Q_i = Q$
- La banda del conjunto queda definida por las etapas de banda más estrecha. El ancho de banda del conjunto es menor que el de las bandas parciales.
- Si todas las etapas son iguales tendremos:

$$g_p(f) = g_{p1}(f_0) \cdot g_{p2}(f_0) \cdot \dots \cdot g_{pn}(f_0) \left( \frac{1}{1+x^2} \right)^n$$

$$g_p(f_0) = g_{p1}(f_0) \cdot g_{p2}(f_0) \cdot \dots \cdot g_{pn}(f_0)$$

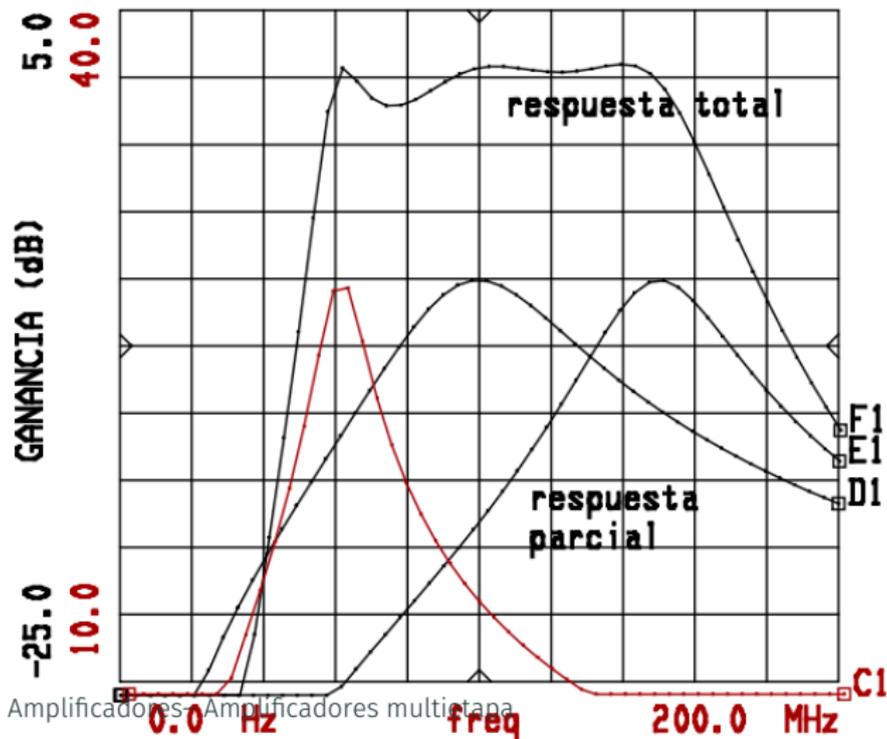
$$B_{-3dB} = \frac{f_0}{Q} \sqrt{2^{1/n} - 1}$$

- La banda se reduce al unir etapas, llegando a la mitad cuando se usan 3 etapas y al 30% cuando se usan 8.

- Cuando queremos una banda superior a la que puede aportar cada etapa por separado → elementos en cascada, con cada etapa centrada en una frecuencia diferente
- Cada etapa tiene:
  - Su frecuencia de sintonía ( $f_{0i}$ )
  - Su factor de calidad ( $Q_i$ )
- Obtenemos una ganancia plana sobre una banda amplia de diseño. Ajustamos para:
  - Máximo ancho de banda
  - Rizado controlado en banda

# AMPLIFICADOR DE SINTONÍA ESCALONADA

- Ejemplo de un amplificador de 3 etapas:  $f_1, f_2, f_3$



# AMPIIFICADORES DE BANDA ANCHA

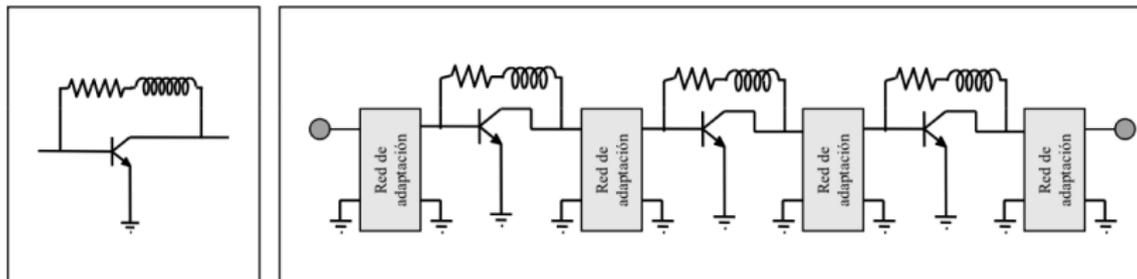
---

Distinguimos dos tipos:

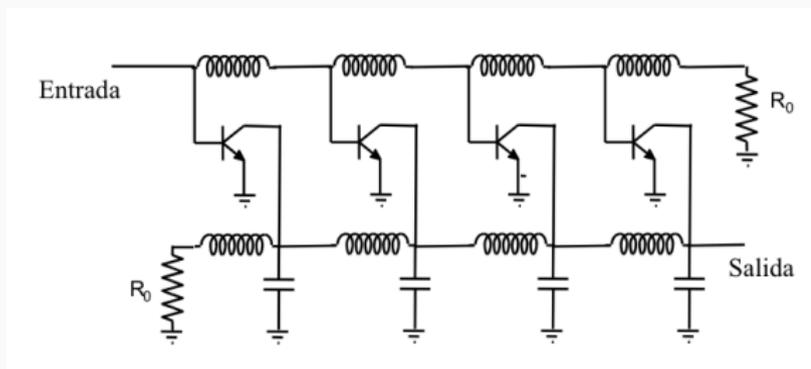
- Amplificadores realimentados
- Amplificadores distribuidos

# AMPLIFICADORES REALIMENTADOS

- De propósito general, con una ganancia baja, valores de ruido y potencia discretos comparados con los sintonizados.
- Permiten obtener una ganancia constante en bandas grandes (una octava)
- Permiten adaptación de impedancias en banda ancha
- Van intercalando filtros que definen la banda y atenuadores para control de ganancia.
- Etapas amplificadoras en cascada unidas por redes de banda ancha → redes disipativas y realimentación de componentes activos.



- Consiguen bandas de trabajo muy grandes (más de una década)
- Se comportan como una línea de transmisión activa → la salida en tensión es creciente a lo largo de la línea
- Las aportaciones de los transistores se suman en fase → la ganancia total es la suma de las ganancias en tensión.
- Precio bajo, buena adaptación, figura de ruido alta, hasta 100GHz



# AMPLIFICADORES DE POTENCIA

---

- **Objetivo:** Su diseño maximiza la potencia que aportan a la salida, dadas las limitaciones del dispositivo.
- Están afectados por unos valores límite: tensión y corriente máxima a la salida, y máxima disipación de potencia.

$$P_{norm} = \frac{P_{RF}}{V_{max}I_{max}}$$

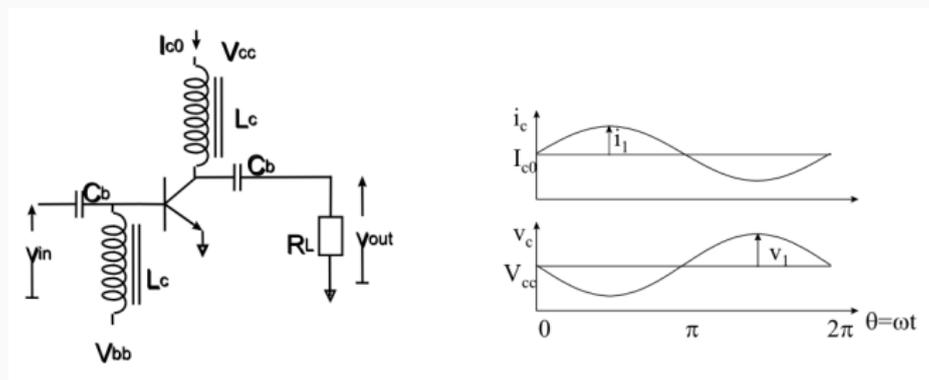
- Rendimiento:

$$\eta = \frac{P_{RF}}{P_{DC}}$$

- Distinguiremos entre amplificadores lineales y no lineales:
  - Lineales: Clase A y Clase B
  - No lineales: Clase C, D y E

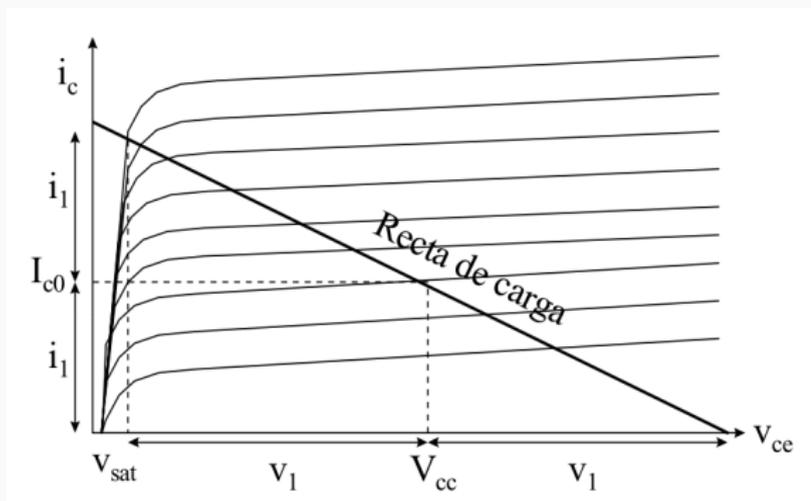
# AMPLIFICADOR DE CLASE A

- Parecidos a los de pequeña señal, pero optimizados para aportar la máxima potencia a la salida
- Se usan sobre todo en modulación AM de bajo nivel



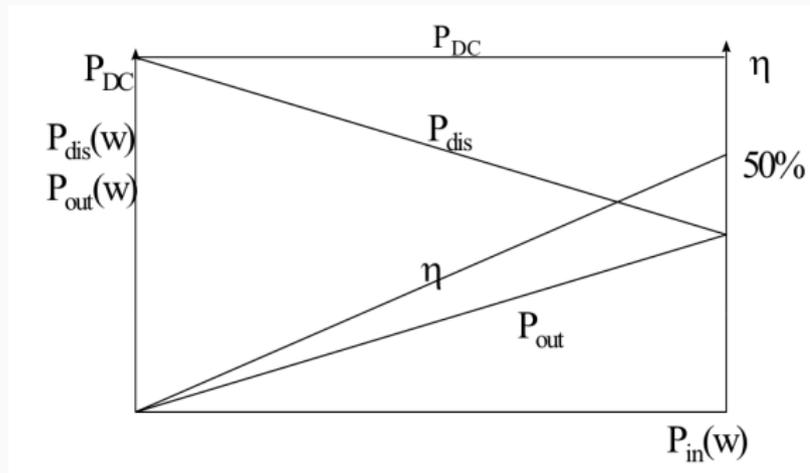
## AMPLIFICADOR DE CLASE A: RECTA DE CARGA

- El transistor se polariza en zona activa, y la máxima potencia está limitada por la entrada en corte o en saturación.
- Para tener máxima potencia, queremos que la entrada en corte y saturación se produzca a la vez al aumentar el nivel de señal.



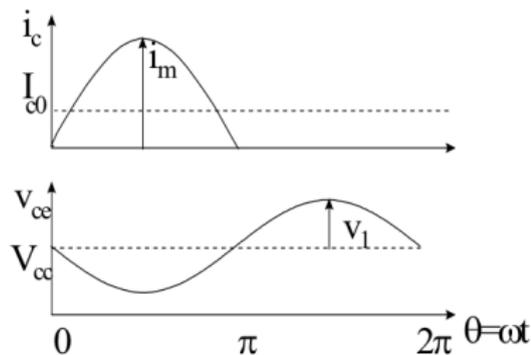
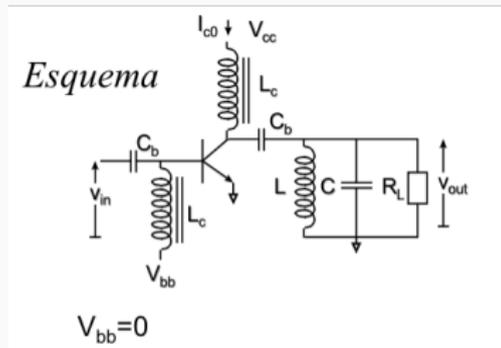
## AMPLIFICADOR DE CLASE A: RENDIMIENTO

- El rendimiento máximo es del 50%.
- Si el nivel de señal no es el máximo, el rendimiento baja
- La potencia disipada aumenta al disminuir la potencia de salida.



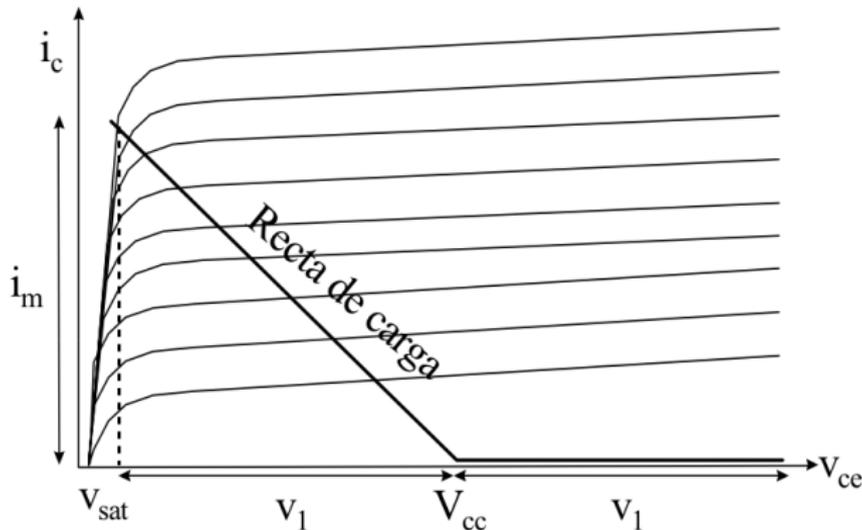
## AMPLIFICADOR DE CLASE B

- Mismo circuito que el amplificador de clase A, pero es imprescindible el circuito resonante.
- Diferencia en la polarización de la base del transistor, que corta el dispositivo durante medio ciclo del periodo de RF



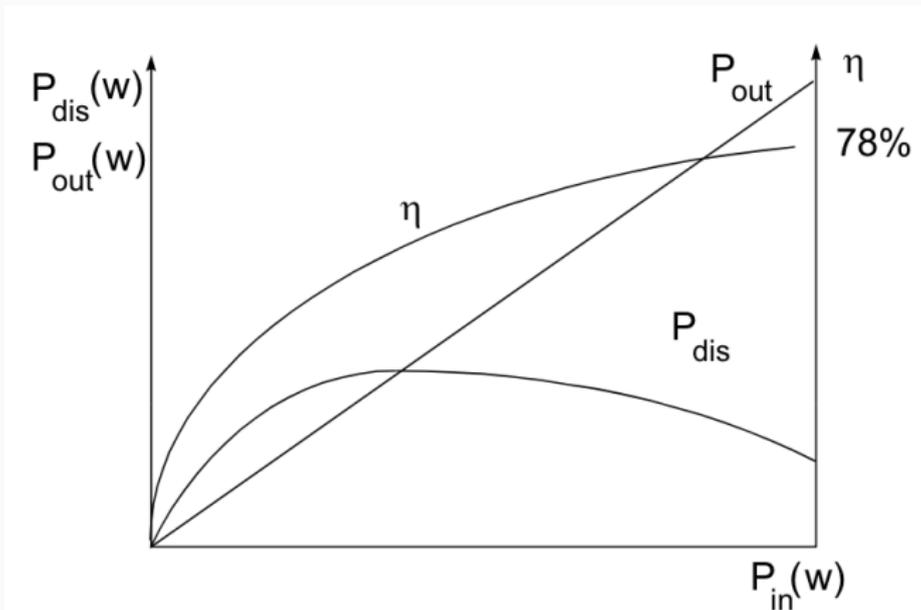
## AMPLIFICADOR DE CLASE B: RECTA DE CARGA

- Durante medio ciclo, el dispositivo se mantiene en corte
- El dispositivo funciona en un régimen no lineal, pero el amplificador es lineal porque la tensión a la salida depende linealmente de la corriente en el colector



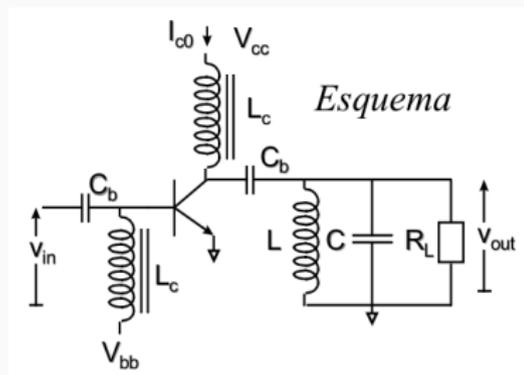
## AMPLIFICADOR DE CLASE B: RENDIMIENTO

- El rendimiento del amplificador aumenta a un máximo teórico del 78%

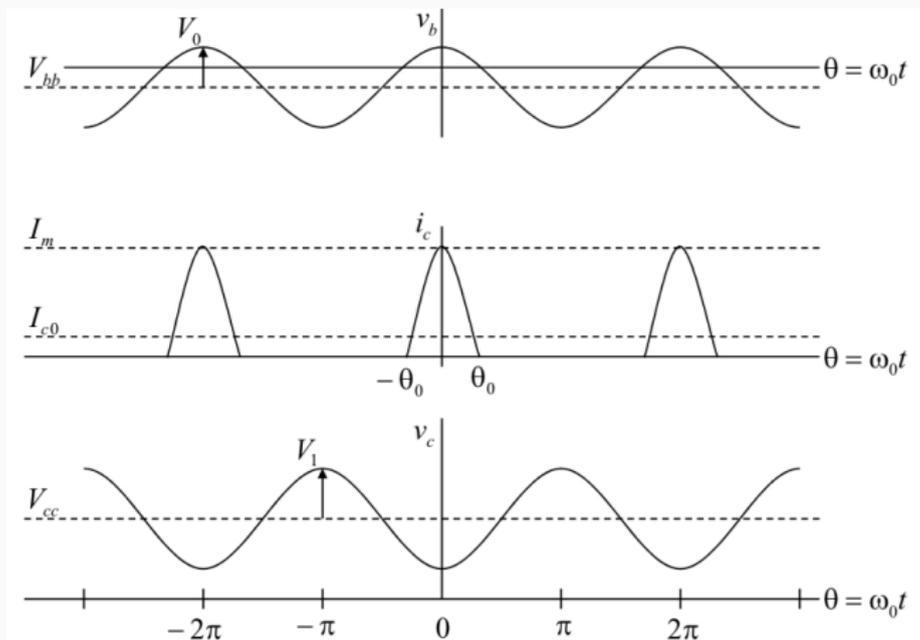


# AMPLIFICADORES DE CLASE C (NO LINEALES)

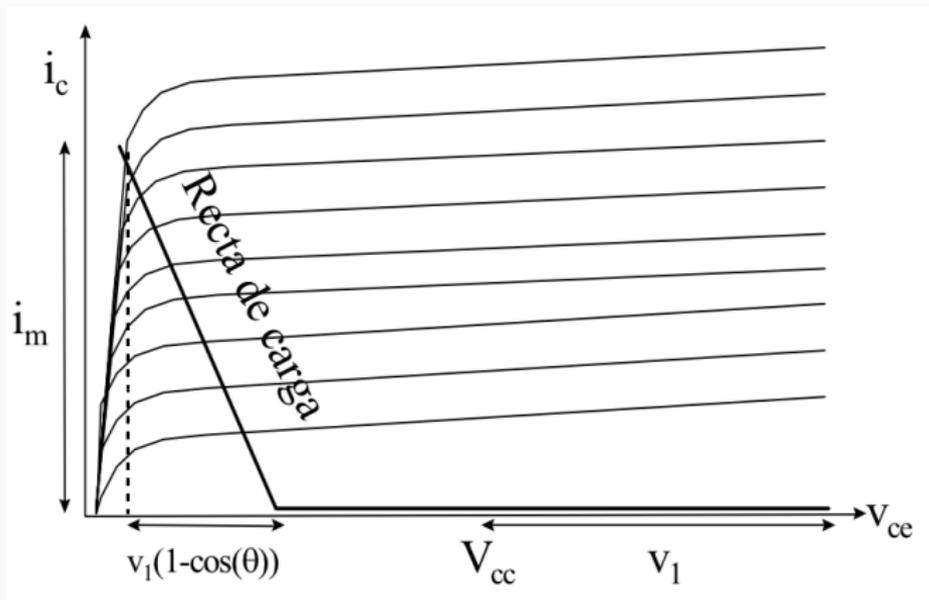
- Reducen el ciclo de conducción con respecto a los de Clase B → fuerzan una polarización inversa a la entrada ( $V_{bb} < 0$ ).
- La tensión en la base hace se trabaje en corte.
- Limitamos el tiempo que el TRT trabaja en zona activa a una porción del ciclo de RF inferior a  $\pi$ .
- El margen angular correspondiente se denomina **ángulo de conducción**  $2\theta$



- La corriente de salida corresponde a una serie de pulsos periódicos

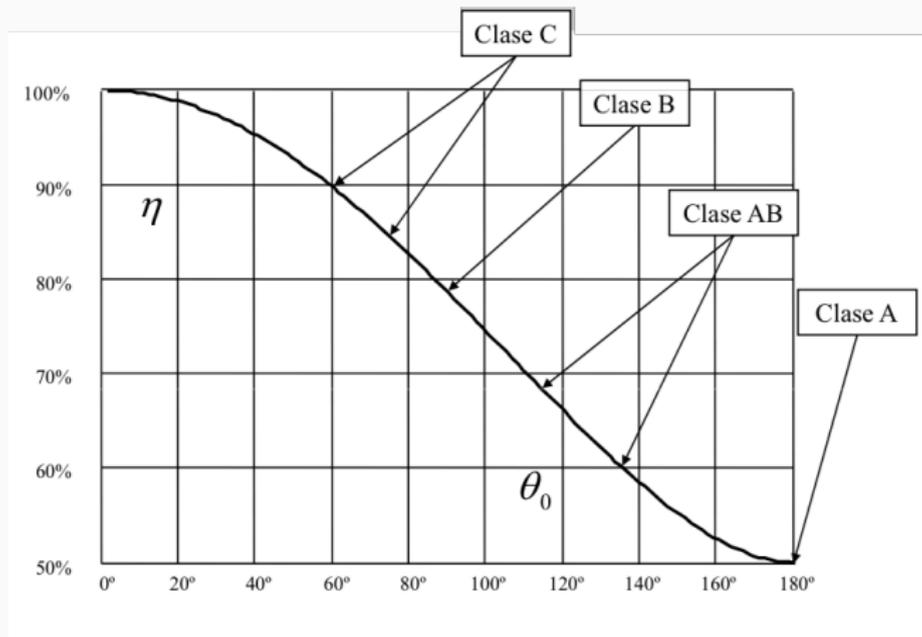


# AMPLIFICADORES DE CLASE C: RECTA DE CARGA



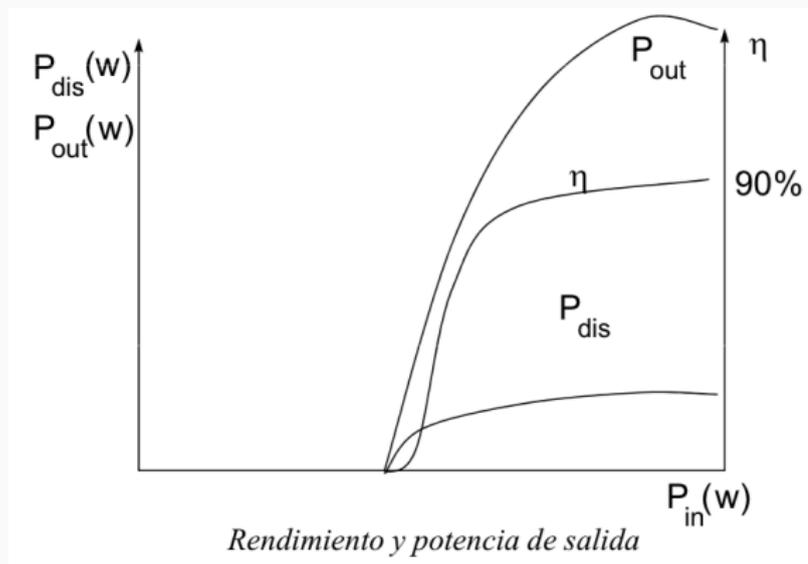
# AMPLIFICADORES DE CLASE C: RENDIMIENTO

- El rendimiento aumenta al reducir el ángulo de conducción  $2\theta \rightarrow$  tiende al 100% cuando el ángulo tiende a cero.



# AMPLIFICADORES DE CLASE C: RENDIMIENTO

- Los rendimientos prácticos son del orden del 90% para semiángulos de conducción alrededor de  $60^\circ$ .

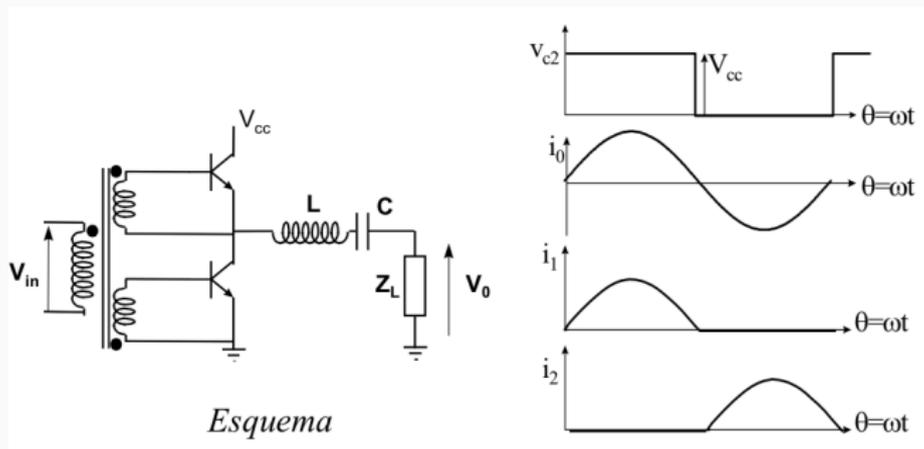


- El amplificador tienen un comportamiento fuertemente no lineal
- La ganancia se reduce fuertemente al reducir el nivel de la entrada
- Su utilidad queda reducida a amplificación de señales moduladas en frecuencia o digitales.

- Hasta ahora hemos supuesto que el nivel de señal a la entrada nunca llevaba el amplificador a saturación, es decir, el transistor trabajaba en modo fuente de corriente.
- Pero es común que los amplificadores de Clase C trabajen en saturación → la tensión de alimentación de la salida fija la potencia → la potencia de salida no depende de la potencia de entrada
- Se sacrifica ganancia pero tenemos estabilidad de potencia. Aunque en la práctica hay pérdidas de potencia y rendimiento debido a los armónicos

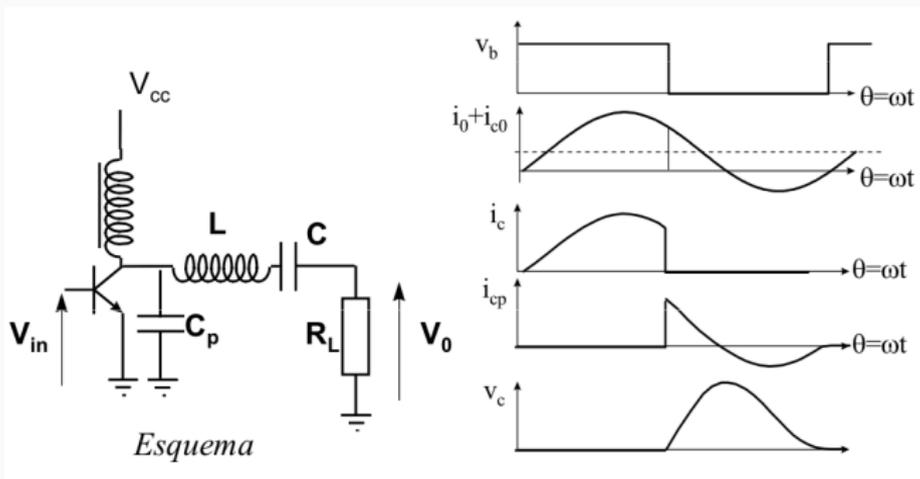
- En los amplificadores anteriores, el rendimiento aumenta conforme la recta de carga se aproxima a la condición de tensión nula en el transistor
- Como la potencia disipada es la integral del producto de tensión y corriente, si logramos que en todo momento o tensión o corriente sean nulas, la potencia disipada será nula.
- En amplificadores de alto rendimiento, los transistores operan como conmutadores para lograr este objetivo.

- Utiliza dos transistores a modo de conmutadores, de forma que conectan la salida alternativamente a alimentación y masa
- El circuito resonante serie a la salida filtra la corriente para tener sólo el armónico fundamental.



- En teoría, el rendimiento obtenido es el 100% porque corriente y tensión en el transistor nunca toman valores simultáneos diferentes de cero → la potencia disipada es nula
- En la práctica, la tensión de saturación es pequeña pero no cero y existe desfase entre tensión y corriente
- El rendimiento práctico oscila entre el 90% y el 99%

- Funcionamiento similar al anterior, pero utiliza un único transistor y un condensador en paralelo para controlar la relación de fase tensión-corriente.



- El amplificador opera en conmutación, poniendo el transistor en corte durante medio ciclo de señal y en saturación el otro medio
- Debemos asegurar que el condensador  $C_p$  no se descargue sobre el transistor saturado
- Ventajas respecto al de Clase D:
  - Utiliza un único transistor
  - Mejor rendimiento y comportamiento porque  $C_p$  compensa la capacidad parásita a la salida
  - Rendimiento a efectos prácticos de entre el 95% y el 99%

## EJERCICIOS

---

## EJERCICIO 1: ETAPA AMPLIFICADORA

Se desea diseñar una etapa amplificadora sintonizada de forma que la ganancia máxima se produzca para 220MHz. Se usa un transistor bipolar con impedancia de salida que puede aproximarse a un RC paralelo con  $R_{ce} = 110\Omega$  y  $C_{ce} = 5pF$ . La impedancia de entrada puede aproximarse por una resistencia  $R_{be} = 30\Omega$ . Tenemos una transconductancia de 0.6.

1. Determine la inductancia de sintonía cuando tenemos una carga  $R_L = 50\Omega$ . Cuál es el factor de calidad?
2. Qué deberíamos hacer para tener un ancho de banda de 20MHz?

## EJERCICIO 2: AMPLIFICADOR MULTITAPPA

Queremos un amplificador sintonizado a 1800MHz con ancho de banda a 3dB de 100MHz y ganancia máxima de 50dB. Se dispone de amplificadores individuales adaptados a  $50\Omega$  y con ganancia de 10dB, así como condensadores y bobinas para las redes de adaptación.

1. Cuántas etapas amplificadoras necesitamos, si todas van sintonizadas a la misma frecuencia?
2. Determine el factor de calidad de los circuitos resonantes si todos son iguales
3. Obtenga los valores de C y L para el circuito resonante de cada etapa.

PREGUNTAS?