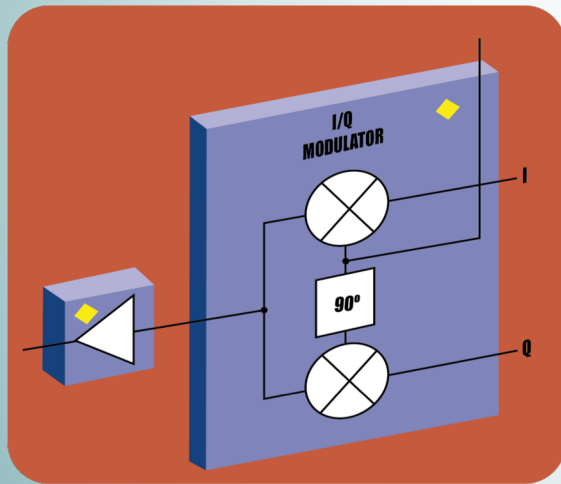


# Electrónica de Radiofrecuencia

## TEMA 4. AMPLIFICADORES DE POTENCIA

### 4.1. LINEALIDAD Y EFICIENCIA. CONCEPTOS BÁSICOS



**Juan Pablo Pascual Gutiérrez**

**Enrique Villa Benito**

**Luisa María de la Fuente Rodríguez**

**José Ángel García García**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES

Este material se publica bajo la siguiente licencia:

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



# Amplificadores de Potencia

## TEMA 4 – Amplificadores de Potencia

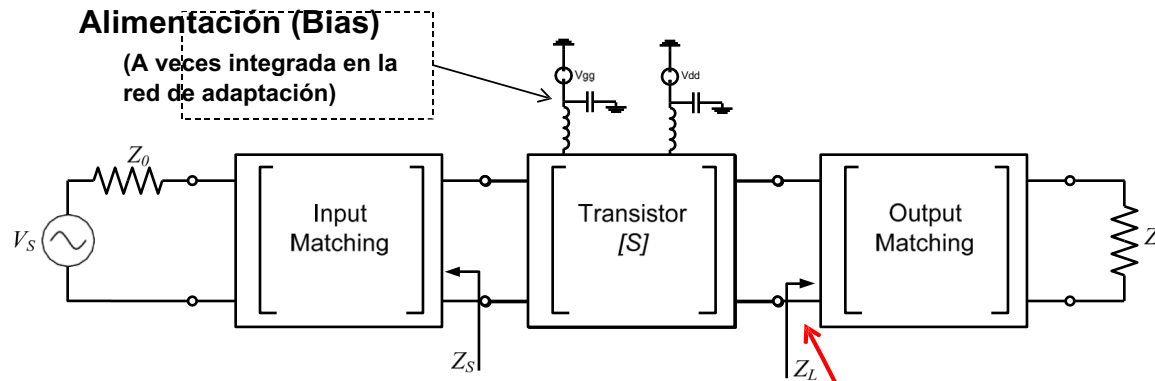
### Parte 1 - Linealidad y Eficiencia. Conceptos básicos

#### Contenidos:

- Amplificadores de pequeña señal versus Amplificadores de Potencia
- Aplicaciones de los Amplificadores de Potencia
- Linealidad en Amplificadores de Potencia
- Efectos de la No Linealidad en la Amplificación de Potencia
- Estimación y Medida de la No Linealidad
- Eficiencia
- Dispositivos para amplificadores de potencia

# Amplificadores de Potencia

## Diseño en pequeña señal

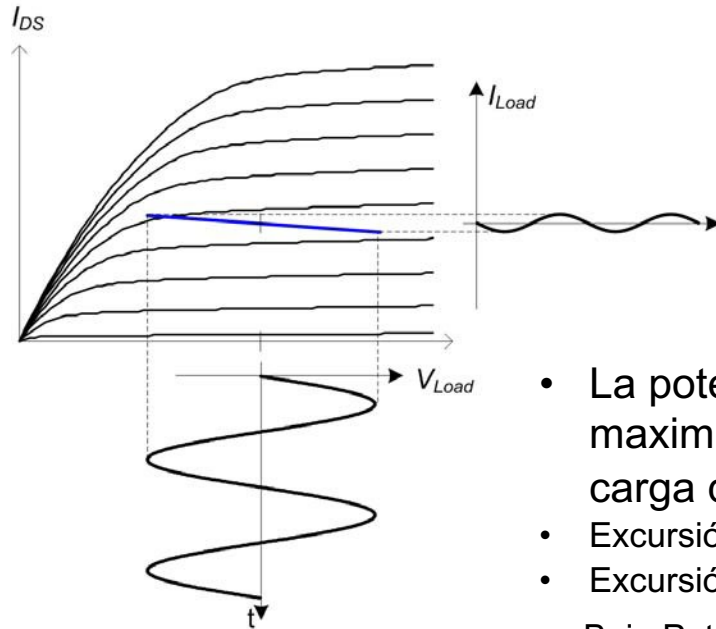


- Max gain:  $\Gamma_S = \Gamma_{in}^*$  and  $\Gamma_L = \Gamma_{out}^*$
- Low noise:  $\Gamma_S = \Gamma_{opt}$  and  $\Gamma_L = \Gamma_{out}^*$
- Power amplifier:  $\Gamma_S = \Gamma_{in}^*$  and  $\Gamma \neq \Gamma_{out}^*$

¡Se necesitan nuevas herramientas de diseño!  
Los parámetros S de pequeña señal no son suficientes.

# Amplificadores de Potencia

## Potencia de salida en pequeña señal



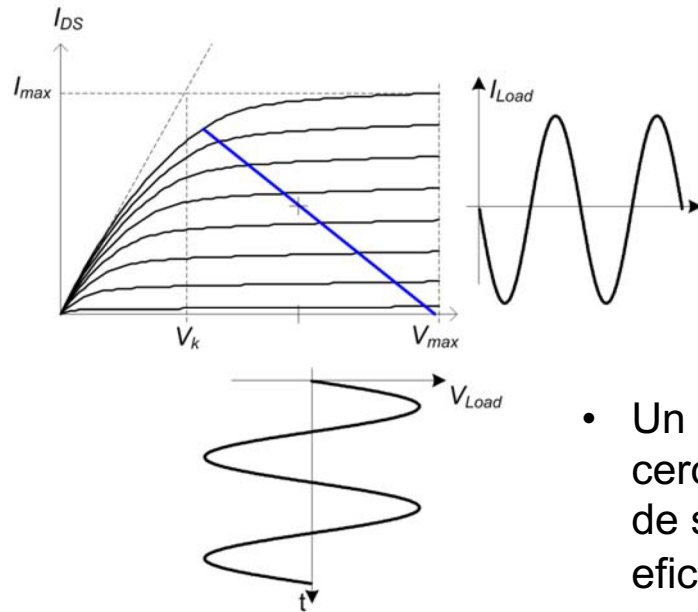
$$P_{out} = \frac{1}{2} |V_{Load}| |I_{Load}|$$

- La potencia de salida no se maximiza con una impedancia de carga de pequeña señal
  - Excursión grande de voltaje ☺
  - Excursión pequeña de corriente ☹
- Baja Potencia!
- Cómo maximizar la potencia de salida?

# Amplificadores de Potencia

## Carga para máxima potencia de salida

- La potencia de salida se maximiza cuando se utilizan por completo las capacidades de voltaje y corriente del transistor.



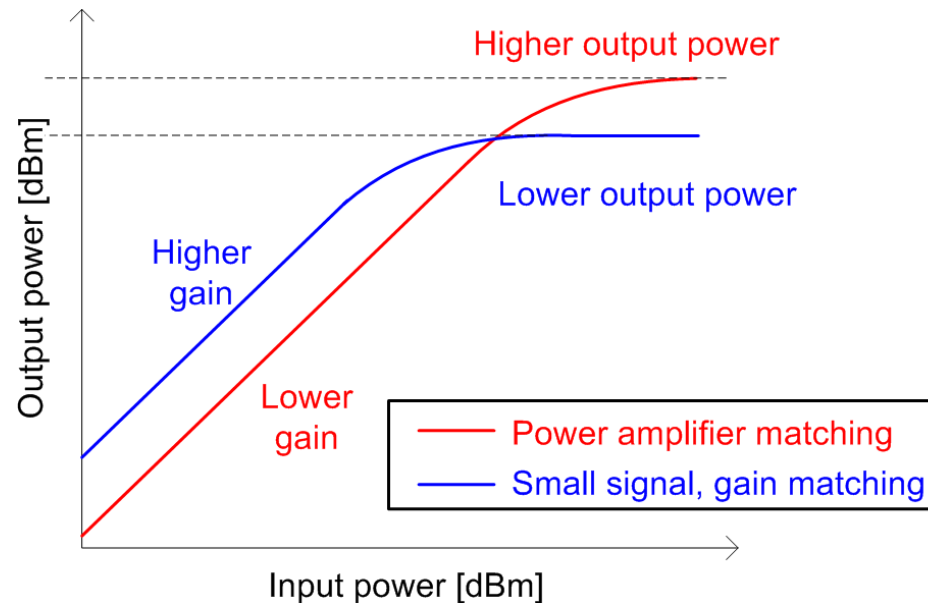
"Cripps load"

$$R_{Load,opt} = \frac{V_{max} - V_k}{I_{max}}$$

- Un voltaje "knee" distinto de cero,  $V_k$ , reduce la potencia de salida y degrada la eficiencia.

# Amplificadores de Potencia

## Comparación barrido Potencia Pin-Pout



- Se necesita una impedancia de carga diferente para obtener o bien la máxima ganancia de pequeña señal o bien la máxima potencia (es decir, en amplificadores de potencia).

# Amplificadores de Potencia

## Aplicaciones:



- Transmisores de telefonía celular

Grandes producciones

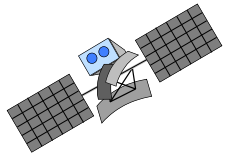
- Transmisores para estaciones base de móviles o Módulos T/R para arrays de antenas

Volúmenes grandes



- Sistemas de monitorización remota de satélites o redes de TV por cable.

Volúmenes moderados



- Satélites/sondas espaciales

Volúmenes pequeños

Nomenclatura: P.A. : Power Amplifiers

# Amplificadores de Potencia

Especificaciones más importantes que influyen en el diseño de los P.A.

- **Sistemas de comunicaciones móviles**



- ✓ **Baterías pequeñas.**

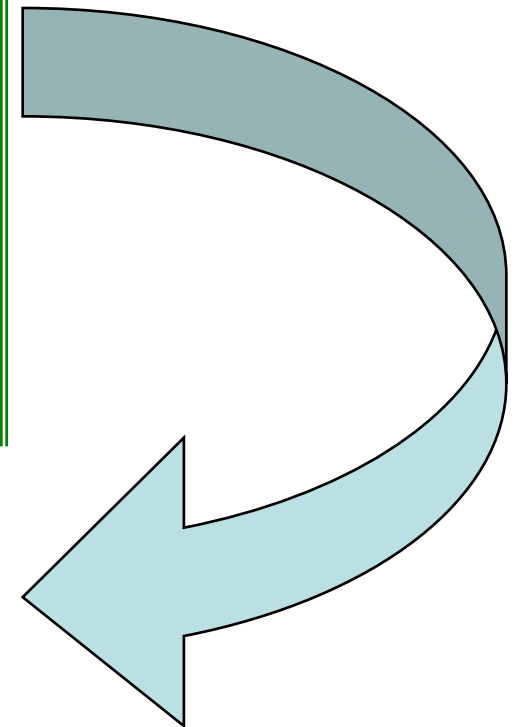
- ✓ **Bajo calentamiento**

- ✓ **Largos periodos de espera y de habla**

- ✓ **Bajo coste de fabricación y empaquetado**

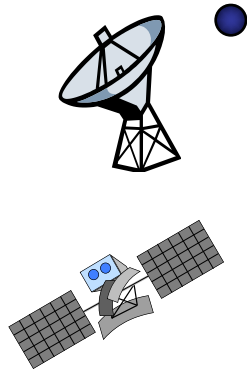
- ✓ **Baja distorsión de la señal**

Operación con bajo voltaje  
Operación para alta eficiencia  
Alta linealidad del P.A



# Amplificadores de Potencia

Especificaciones más importantes que influyen en el diseño de los P.A.



- **Sistemas fijos o remotos**
  - ✓ Máxima potencia de salida
  - ✓ Fiabilidad
  - ✓ Baja temperatura de canal (transistores)

Operación con bajo voltaje  
Operación para alta eficiencia  
Alta linealidad del P.A

Baja potencia disipada



**Se requieren metodologías específicas de diseño de PAs**

# Amplificadores de Potencia

## Linealidad en Amplificadores de Potencia

- **Linealidad:** Importante en modulaciones complejas → Mayoría de los sistemas de comunicaciones actuales.
  
- **Obtención de linealidad:**
  - 1º - Cadena de amplificadores lineales → Funcionando antes de la compresión → Dispositivos sobredimensionados (back-off) → Procedimiento caro.
  
  - 2º - Técnicas clásicas → Combinación adecuada de amplificadores de potencia no lineales: Predistorsión, Feedforward, Feedback, etc. → a nivel de sistema.
  
  - 3º - Técnicas a nivel de dispositivo → Estudio de los dispositivos activos para reducir la distorsión de intermodulación de 3<sup>er</sup> orden.

# Amplificadores de Potencia

## Linealidad en Amplificadores de Potencia

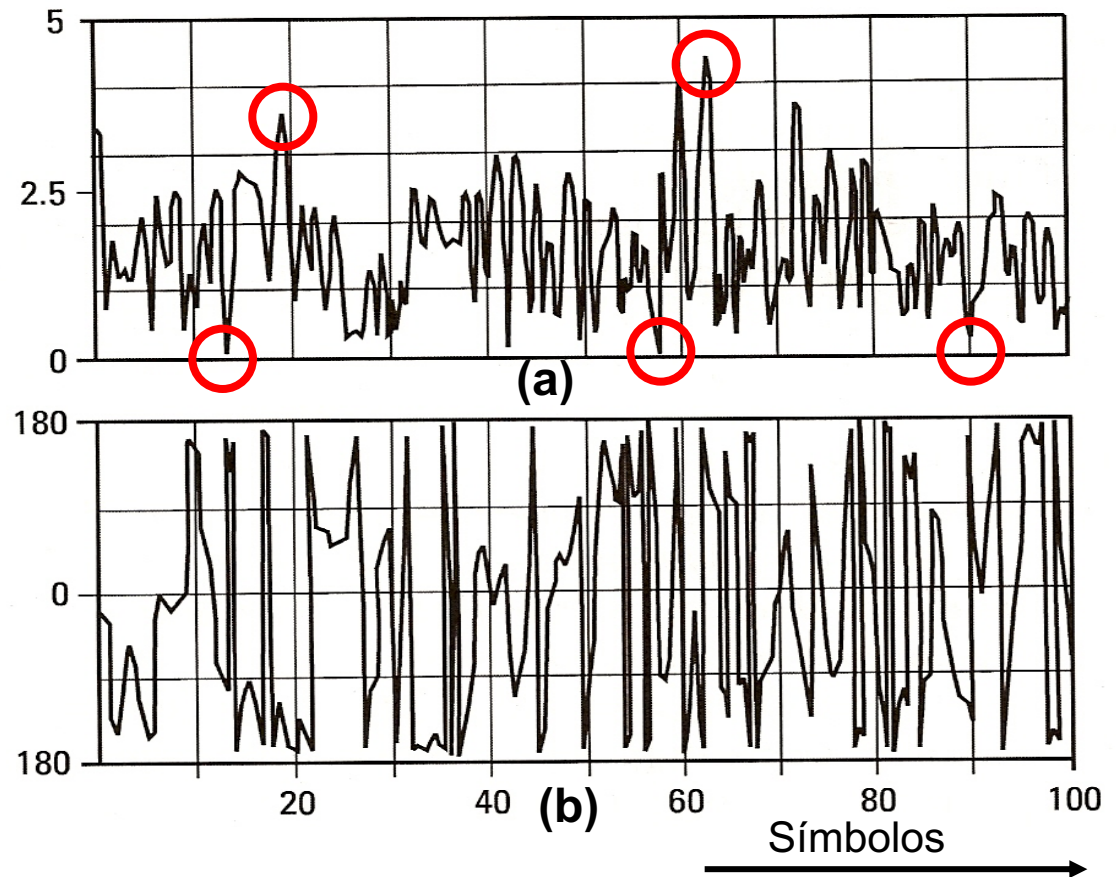
### ■ Señal típica en comunicaciones digitales. Señal WCDMA

(Wideband Code Division Multiple Access Ej.: 3G UMTS )

Trayectorias de  
envolvente compleja:

(a) Magnitud  
(b) Fase

Cada combinación de  
valores de magnitud y  
fase corresponde a un  
símbolo, secuencia de  
datos digitales, que se  
envían secuenciados en  
el tiempo



# Amplificadores de Potencia

## Linealidad en Amplificadores de Potencia

### ■ Comentarios sobre este tipo de señales (1):

- Potencia de pico es sustancialmente mayor que la potencia media → potencia de pico no se alcanza de forma continua. (PAPR: Peak to Average Power Ratio, Crest Factor: Valor máximo/valor eficaz ).
- En algunos casos se intenta limitar la amplitud para no alcanzar el valor cero (no es el caso de la figura) ya que los pasos por 0 favorecen la distorsión
- El “Symbol Clock Rate” es al menos dos órdenes de magnitud inferior que la portadora de RF subyacente (Ej.: portadora GHz y S.C.R. MHz)

# Amplificadores de Potencia

## Linealidad en Amplificadores de Potencia

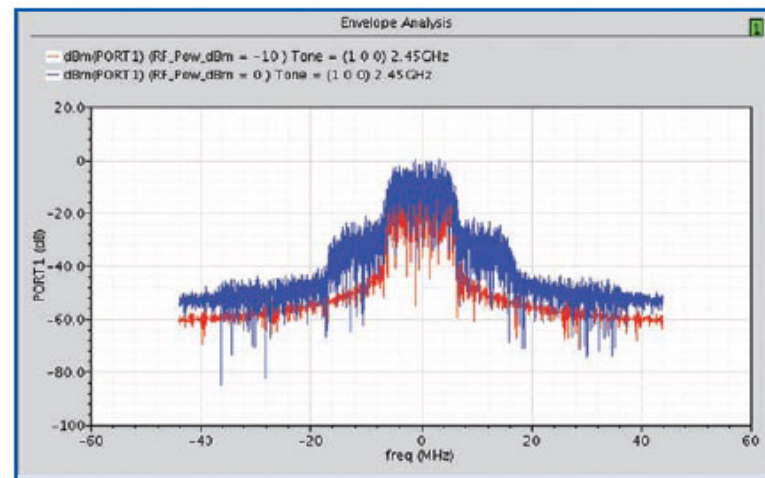
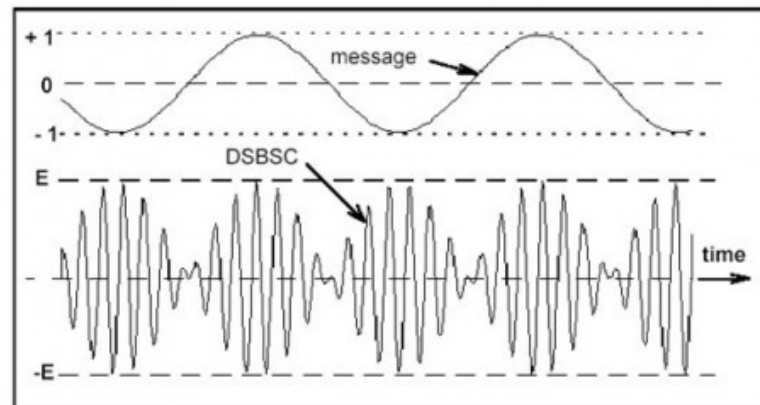
### ■ Comentarios señales (2):

- Existen dos dominios temporales:

(a) Dominio temporal “rápido” en el que se pueden resolver las variaciones de la portadora de RF.

(b) Dominio de la envolvente, “lento” donde se resuelve la modulación de la portadora.

- La distorsión tanto en amplitud como en fase se transformará en un ensanchamiento del espectro de la señal



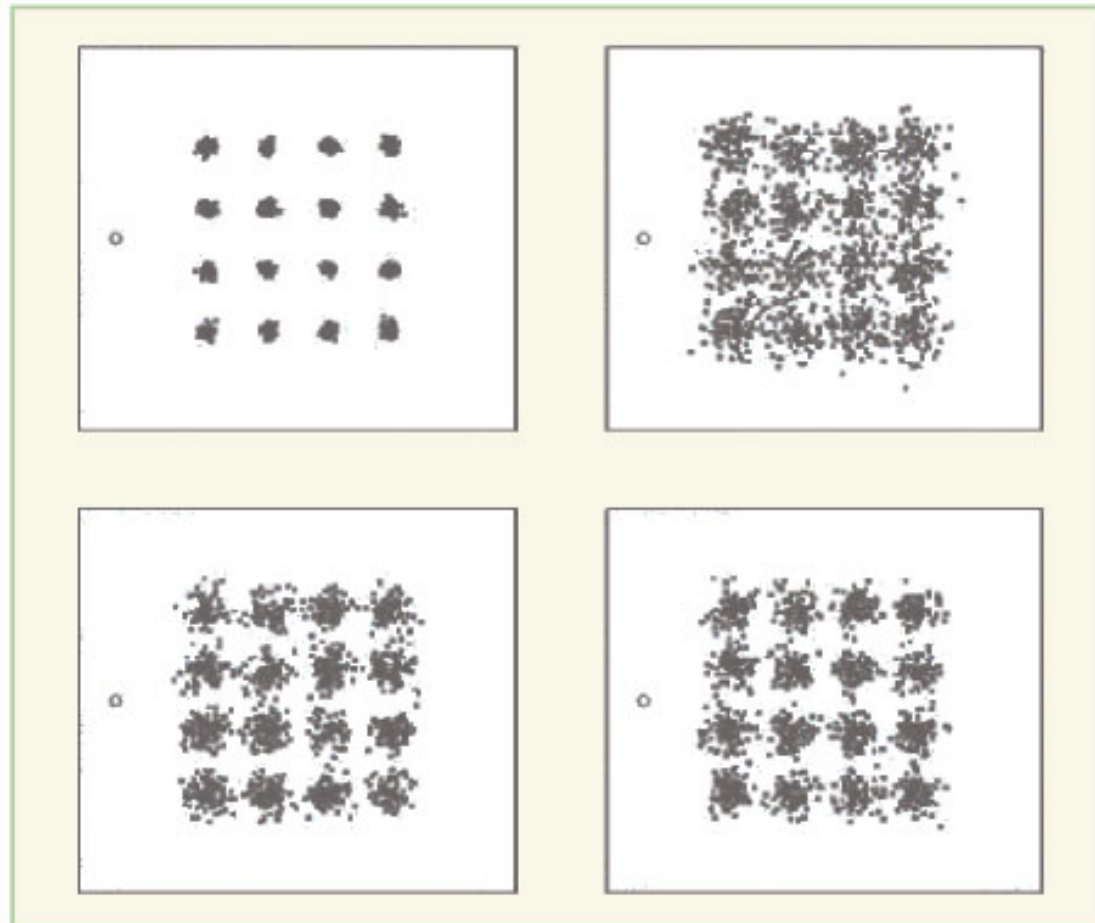
# Amplificadores de Potencia

## Linealidad en Amplificadores de Potencia

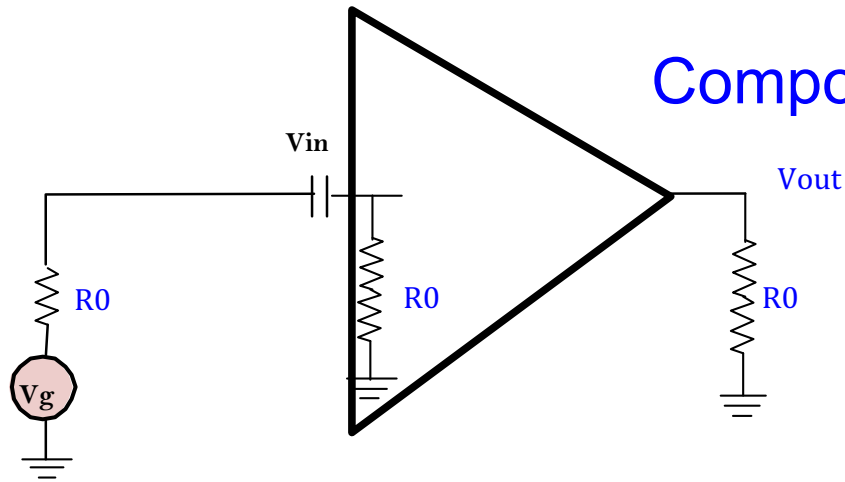
- **Señales moduladas de banda ancha:** No linealidades producen distorsión de intermodulación → Producen ensanchamiento del espectro → Interferencias en los canales adyacentes.
- **Señales de envolvente constante:** La magnitud permanece cte. No son necesarias técnicas de linealización. CW, FM, FSK, GMSK (telefonía GSM).
- **Señales de tipo multiportadora o modulaciones digitales (QPSK, QAM, OFDM ...):** Técnicas de linealización para evitar cualquier distorsión.

# Amplificadores de Potencia

Ejemplo de efecto de la distorsión en una modulación 16 QAM



# Amplificadores de Potencia



Comportamiento ideal vs. real

$$V_{out} = G V_{in}$$

Suponiendo adaptación  $R_{in}=R_0 \rightarrow V_{in}=V_g/2 \rightarrow P_{av}=P_{in}$

$$P_{out} = \frac{1}{2} \frac{(V_{out})^2}{R_0} = \frac{1}{2} \frac{(G V_{in})^2}{R_0} = \frac{1}{2} \frac{(G V_g / 2)^2}{R_0}$$

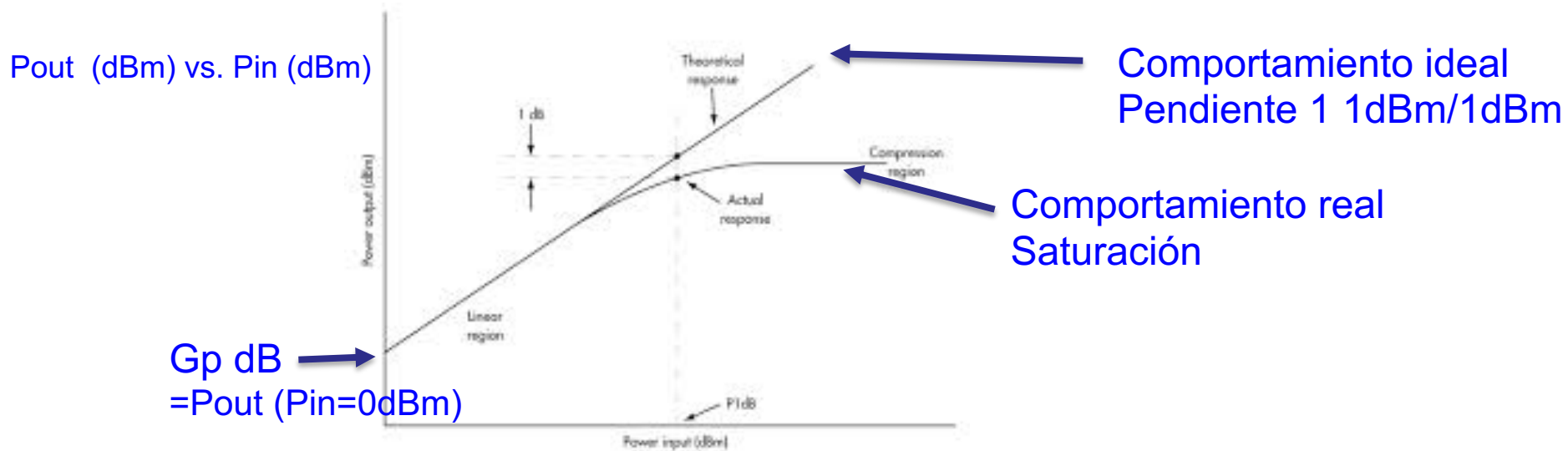
$$P_{out} = \frac{G^2 V_g^2}{8 R_0} = \frac{G^2}{8} \frac{8 R_0 P_{av}}{R_0} = G^2 P_{av} = G_p P_{in}$$

# Amplificadores de Potencia

$$P_{out} (dBm) = 10 \log 10 \left( \frac{P_{out}}{1mW} \right)$$

$$P_{out} (dBm) = 10 \log 10 (G_p P_{in}) = P_{in} (dBm) + 10 \log 10 (G_p)$$

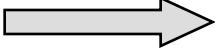

$$P_{out} (dBm) = P_{in} (dBm) + 20 \log 10 (G_v) = P_{in} (dBm) + G_p (dB)$$



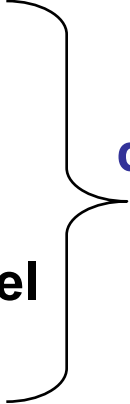
# Amplificadores de Potencia

## Métodos para mejorar la Linealidad

### Tradicionales:

- Utilización de Backoff de Potencia.  **Ineficiente**
- Métodos de Linealización Externa a Nivel de Sistema.  **Sistemas Complejos**

### Nuevas tendencias:

- Optimización de las Propiedades de los Dispositivos Activos
  - Métodos de Linealización Externa a Nivel de Dispositivo
-  **Control preciso de las características no lineales de los dispositivos**

# Amplificadores de Potencia

## Efectos de la no linealidad en Amp. de Potencia

- **Efecto fundamental:** Reproducción incorrecta de la señal amplificada.
- **Produce:** Distorsión armónica, recrecimiento espectral, etc.
- **No linealidad en amplitud (Conversión AM-AM):** Saturación, ganancia variable → amplitud instantánea (o de la envolvente) de la señal de salida tenga forma diferente de la de entrada.
  - Causa: No linealidad resistiva o sin memoria.
  - Señales con envolvente constante → No hay distorsión
  - Señales digitales mayoría sist. telecom. actuales: QPSK (envolvente cte.) y QAM (no cte.)
  - Ocupan un BW grande y alta velocidad de datos
  - Se utilizan técnicas de conformación de pulsos (shaped data pulse)
  - Método común: utilizar el espectro del canal con un filtrado coseno alzado
  - Situación de envolvente no constante. Transiciones símbolos → Nuevas modulaciones (DPSK).

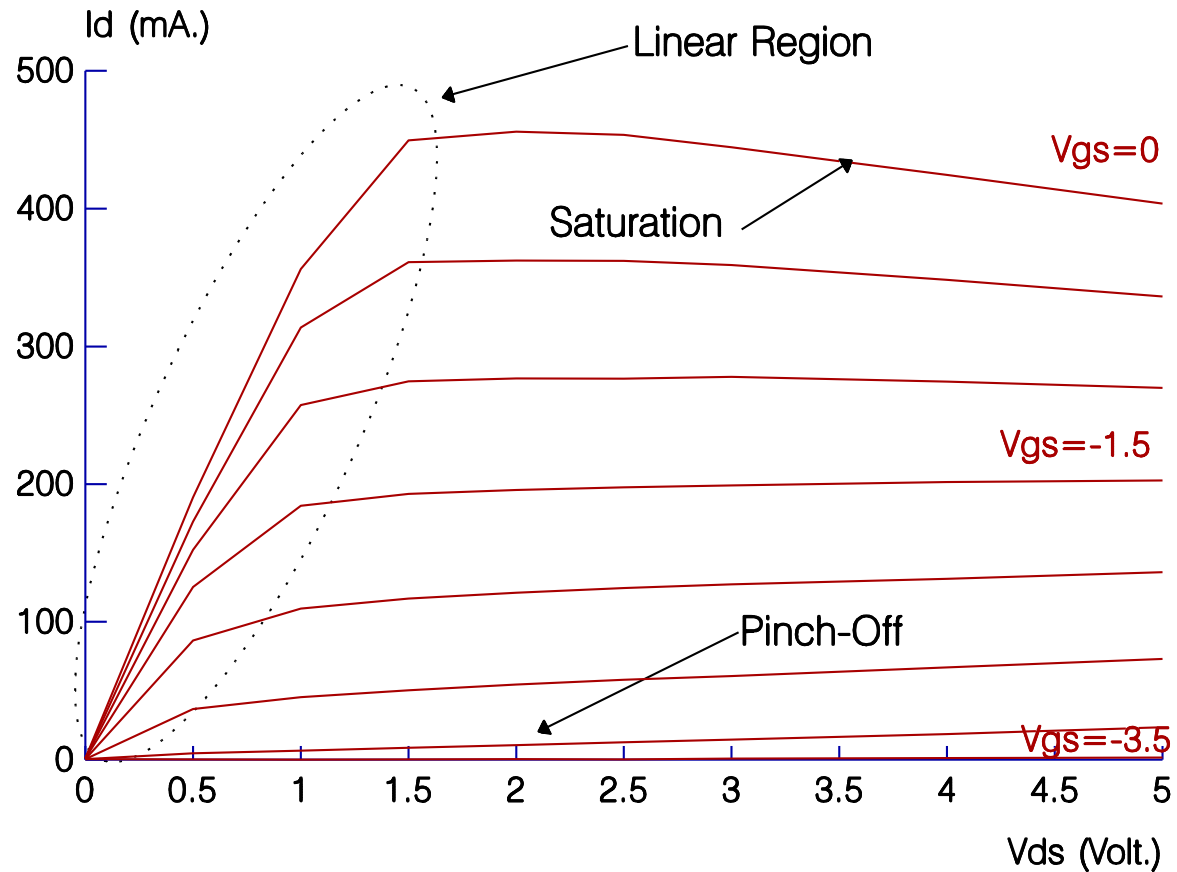
# Amplificadores de Potencia

## Efectos de la no linealidad en Amp. de Potencia

- **Conversión AM-PM (amplitud a fase):** Se traduce en un cambio de fase dependiente de la amp. de la señal → Modulación de fase de la señal no deseada a la salida.
- **Origen de la conversión AM-PM:** Fenómeno asociado a las componentes reactivas (C,L) del circuito amplificador. Dependiendo de la constante de tiempo se dividen en dos:
  - 1.- Cte. de tiempo de corta duración: Debida a las ctes de tiempo de los componentes reactivos de los transistores (cap. parasitas valores pequeños) y redes de adaptación. Afecta a las señales de RF.
  - 2.- Cte. de tiempo de larga duración: Debida por ejemplo a redes de polarización, desacoplos DC, autocalentamiento y fenómenos de dispersión de baja frecuencia. Afecta a la envolvente de las señales.

# Amplificadores de Potencia

## Características DC



Origen de la principal no linealidad: I-V Transistor

# Amplificadores de Potencia

## Análisis en series de potencias con dos tonos (1)

- Análisis de dos tonos → Basado series de potencia o en series de Volterra.
- Aproximación tradicional para analizar los efectos no lineales en amp. de RF
- Amplificador débilmente no lineal → Voltajes entrada salida relacionados utilizando la formulación de series de potencias:

$$v_0 = a_1 \cdot v_i + a_2 \cdot v_i^2 + a_3 \cdot v_i^3 + \dots$$

- $v_0$  y  $v_i$  voltajes dependientes de t que representan las señales RF de salida y entrada respectivamente.
- Los coeficientes  $a_n$  : escalares que caracterizan al amplificador y pueden ser determinados experimentalmente. (a1=Gv : ganancia lineal)
- Tendremos un conjunto de coeficientes para una frecuencia, unas condiciones de polarización y unas condiciones de sintonía.

# Amplificadores de Potencia

## Análisis en series de potencias con dos tonos (2)

- Señal de entrada de dos tonos de RF de igual amplitud (misma banda) y su diferencia de frecuencias muy pequeña respecto a la frec. de cada una de ellas

$$v_i(t) = v \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + v \cdot \cos(\omega_2 \cdot t)$$

Ej.: dos canales TV

- La señal de salida:

$$\begin{aligned} v_0(t) = & a_1 \cdot v \cdot [\cos(\omega_1 \cdot t) + \cos(\omega_2 \cdot t)] + \\ & + a_2 \cdot v^2 \cdot [\cos(\omega_1 \cdot t) + \cos(\omega_2 \cdot t)]^2 + \\ & + a_3 \cdot v^3 \cdot [\cos(\omega_1 \cdot t) + \cos(\omega_2 \cdot t)]^3 + \\ & + a_4 \cdot v^4 \cdot [\cos(\omega_1 \cdot t) + \cos(\omega_2 \cdot t)]^4 + \\ & + a_5 \cdot v^5 \cdot [\cos(\omega_1 \cdot t) + \cos(\omega_2 \cdot t)]^5 + \dots \end{aligned}$$

- Cada línea representa un grado de distorsión de la señal.

- Cada grado de distorsión genera un número de productos de distorsión del mismo grado o menor. Ejemplo: El 4º genera productos de 4º y de 2º orden.

- Productos de mayor interés → Intermodulación de tercer orden: Componente principal en el término de 3º grado (caen en banda)  
Tiene componentes que provienen ordenes impares mayores

$$\begin{aligned} & \frac{3}{4} a_3 \cdot v^3 \quad (3^{\text{er}} \text{ orden}) \\ & \frac{25}{8} a_5 \cdot v^5 \quad (5^{\text{o}} \text{ orden}) \end{aligned}$$

# Amplificadores de Potencia

## Fenómenos de Distorsión No Lineal

### Un tono:

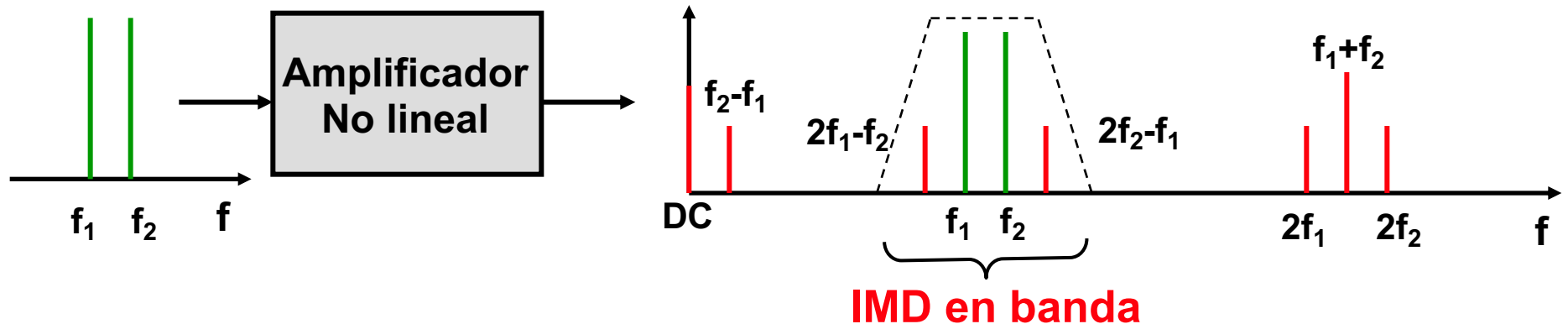
- Compresión/Expansión de Ganancia
- Distorsión Armónica

### Señales Moduladas:

- Conversión AM/AM y AM/PM
- Modulación Cruzada

### Dos tonos:

- Desensibilización (ver definición pag. sig.\*)
- **Distorsión de Intermodulación (IMD)**



# Amplificadores de Potencia

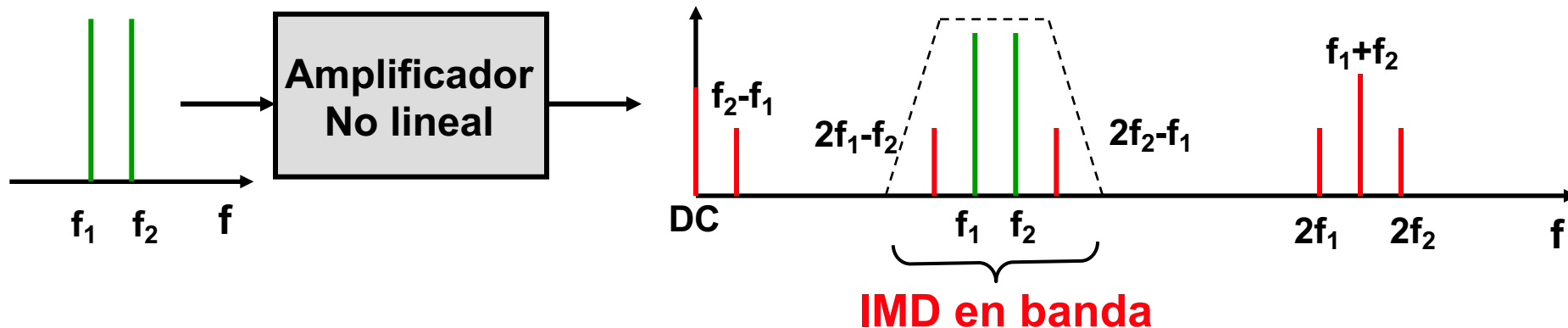
\*Ejemplo de definición de desensibilización (manual comisión Comunicaciones Ar.)

La selectividad de canal adyacente y desensibilización de un receptor es la medida de su capacidad para recibir una entrada de señal modulada en su canal de frecuencia asignado en presencia de una segunda frecuencia de entrada modulada que se encuentre un canal (30 KHz) más arriba o un canal (30 KHz) más debajo de la frecuencia del canal asignado.

La selectividad y desensibilización de canal alterno de un receptor es la medida de su capacidad para recibir una señal de entrada modulada en su canal de frecuencia asignado en presencia de una segunda frecuencia de entrada modulada que se encuentre dos canales (60 KHz) más arriba o dos canales (60 KHz) más debajo de la frecuencia del canal asignado.

# Amplificadores de Potencia

## Fenómenos de Distorsión No Lineal

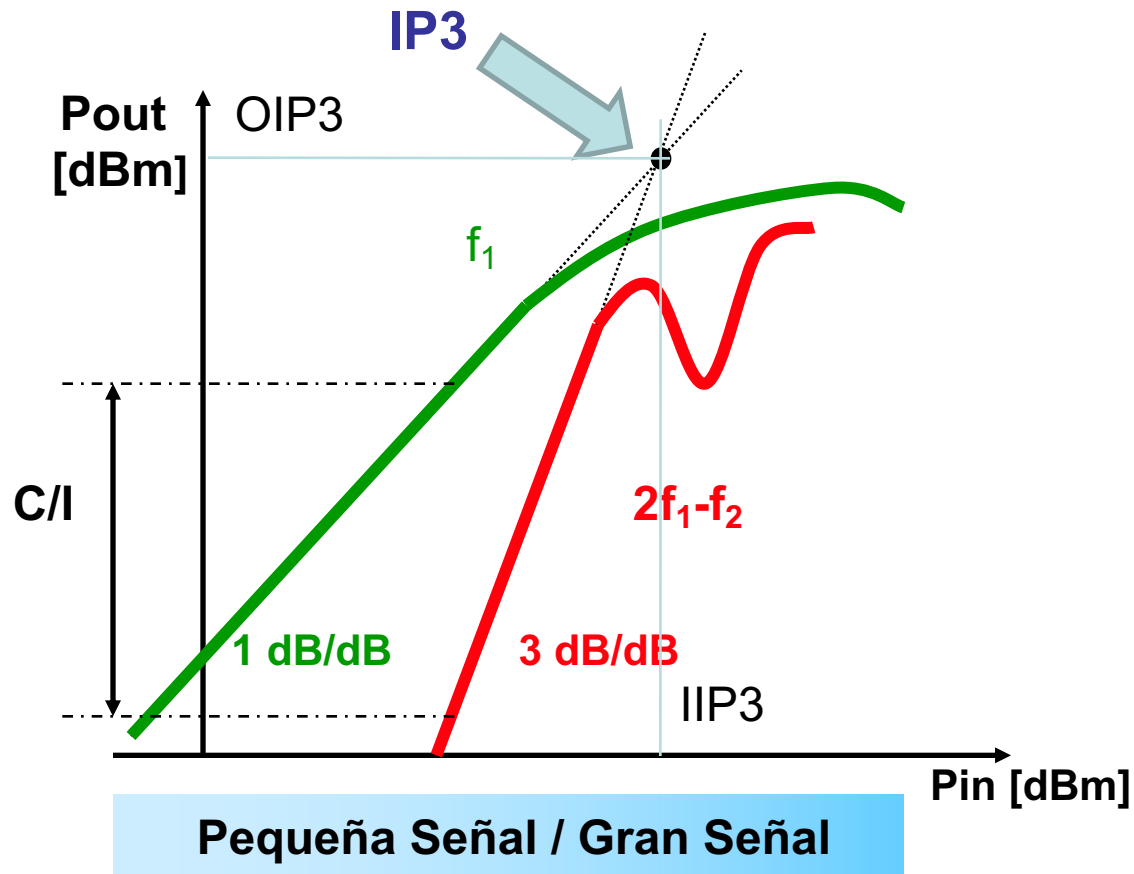


### Distorsión en Banda

- **Distorsión co-canal** → @  $f_1$  y  $f_2$
- **Distorsión de canal adyacente** → @  $2f_1 - f_2$  y  $2f_2 - f_1$

# Amplificadores de Potencia

## Experimento de dos tonos

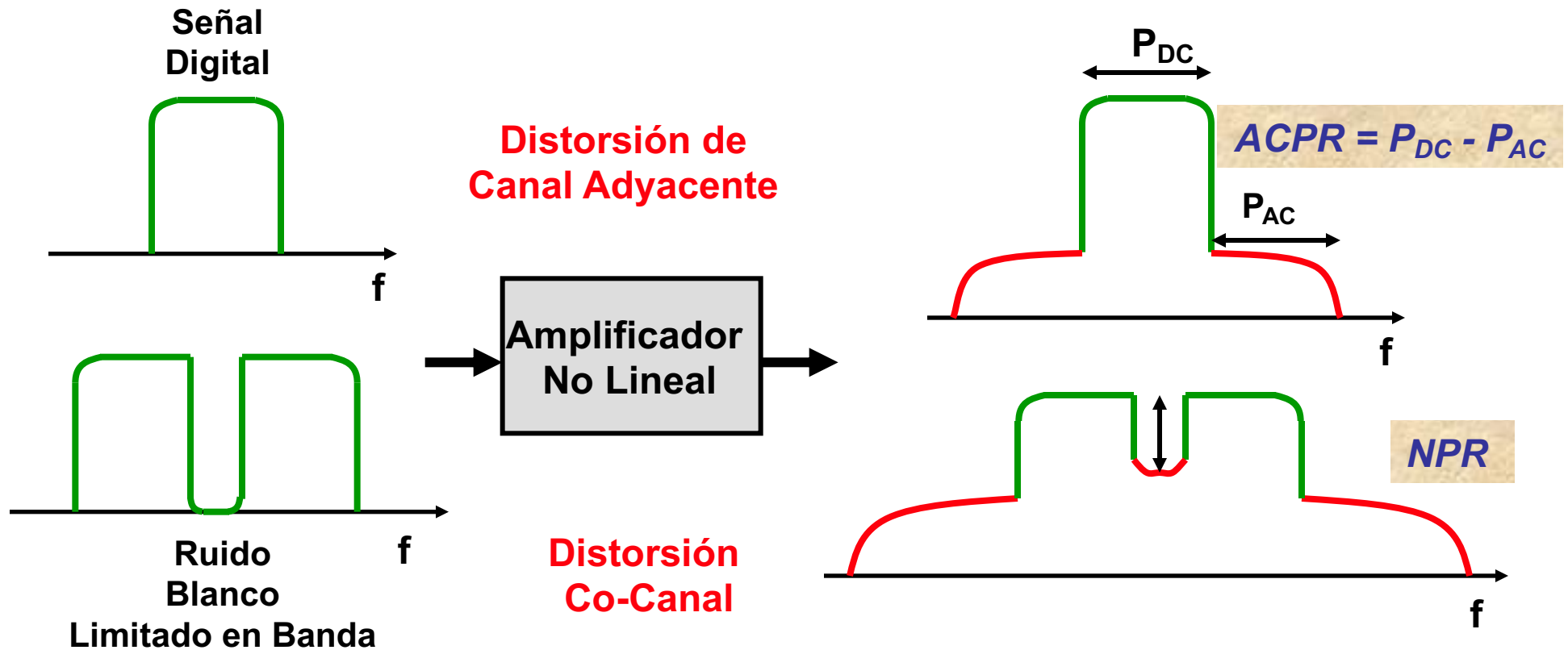


### Figuras de Mérito

- C/I @  $P_{out}$
- IP3: output o input (OIP3, IIP3)

# Amplificadores de Potencia

## IMD ante excitación multitono



# Amplificadores de Potencia

## Eficiencia (1)

Parámetro crítico en amplificadores de potencia. Se utilizan tres tipos de definiciones:

- **Eficiencia de Drenador:** Amplificadores basados en transistores FET. Razón entre la potencia de salida de RF y la potencia de DC suministrada:

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

- **Eficiencia de Potencia Añadida (PAE):** Relación existente entre la diferencia de potencia de RF de salida menos la potencia de RF de entrada y la potencia de DC consumida.

$$PAE = \frac{P_{OutRF} - P_{inRF}}{P_{DC}}$$

# Amplificadores de Potencia

## Eficiencia (2)

Teniendo en cuenta que:

$$P_{dis} = P_{inRF} + P_{DC} - P_{outRF} \qquad G = \frac{P_{outRF}}{P_{inRF}}$$

Se tiene:

$$PAE = \frac{P_{OutRF} - P_{inRF}}{P_{DC}} = \frac{P_{outRF}}{P_{DC}} \left( 1 - \frac{1}{G} \right) = \eta \left( 1 - \frac{1}{G} \right) \quad \begin{array}{l} \text{NOTAR: } G \gg 1 \\ \text{PAE} \rightarrow \eta \end{array}$$

$$PAE = \frac{P_{OutRF} - P_{inRF}}{P_{DC}} = \frac{P_{DC} - P_{dis}}{P_{DC}} = \left( 1 - \frac{P_{dis}}{P_{DC}} \right) \quad \begin{array}{l} \text{NOTAR: } PAE \rightarrow 1 \\ P_{dis} \rightarrow 0 \end{array}$$

# Amplificadores de Potencia

## Eficiencia (3)

### Eficiencia Promedio:

- Eficiencia instantánea → Valor de la eficiencia de drenador para un determinado valor de la potencia de salida ( $P_{out}$  en un instante de tiempo) → Máxima para el valor de pico.

- Sistemas con modulación en amplitud → Variación de la eficiencia con el tiempo → Definición más útil → Eficiencia Promedio:

$$PAE = \frac{P_{\Delta OutAVG}}{P_{DC}}$$

$P_{\Delta OutAVG} \Rightarrow$  Valor promedio de  $P_{OutRF} - P_{inRF}$

# Amplificadores de Potencia

## Eficiencia (4)

### ■ Back-Off:

- Cuando un amplificador está trabajando por debajo de la potencia que es capaz de suministrar a 1 dB de compresión de ganancia se dice que tiene un determinado Back-Off.

### ■ Casos en que se utiliza Back-Off:

- 1.- Evitar interferencias con otros usuarios que utilicen la misma banda. Potencia, en condiciones normales, menor que la máxima a 1 dB de compresión. La potencia máxima de un enlace se calcula en condiciones de peor caso. Back-Off típico → 10-20 dB.
- 2.- Para disminuir los productos de intermodulación a la salida (cumplir especificaciones).

**Ejemplo:** Especificación típica de IM3 es de -60 a -80 dBc. Un amplificador trabajando a 1 dB de compresión tiene una IM3 de -20 dBc. Para bajar otros 40 dBc se requiere un Back-Off de 20 dB (aprox.) → Un amp. de 100 W necesitaría trabajar a 1 W de potencia de salida.

# Amplificadores de Potencia

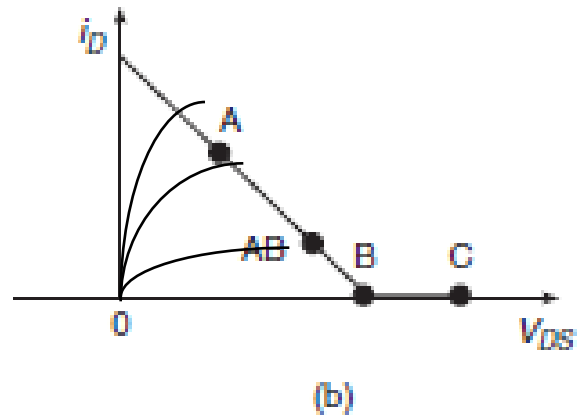
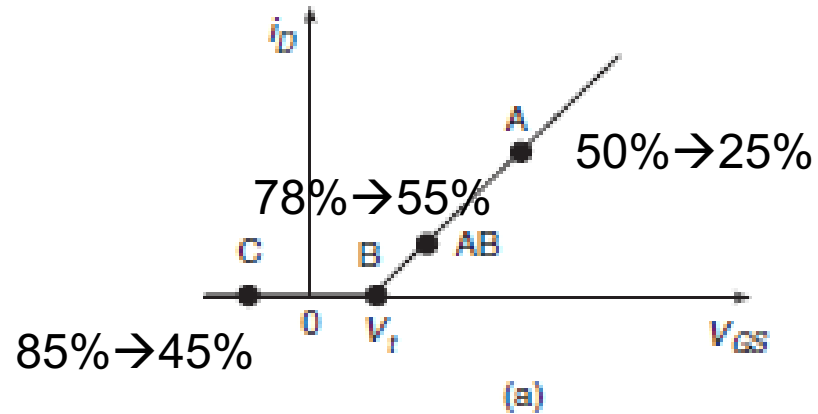
## Eficiencia (5)

### ■ Problemas del Back-Off:

- Principal problema → Pérdida de eficiencia o rendimiento de los amplificadores de potencia.
- Amplificador Clase A: Un Back-Off de 3 dB produce una pérdida de eficiencia del 25% (de 50% a 25%).
- Amplificador Clase B: Un Back-Off de 3 dB reduce la eficiencia del 78.5% al 55%.
- Amplificador Clase C: Un Back-Off de 3 dB reduce la eficiencia del 85% al 45%.
- Amplificadores de gran potencia → Muy caros → trabajar con Back-Off no es rentable → Búsqueda de métodos de linealización.

# Amplificadores de Potencia

## Efecto Back-Off en la eficiencia de las clases de operación más comunes



# Amplificadores de Potencia

## ■ Ejercicio ejemplo de cálculo de eficiencia:

- Datos:

Potencia DC consumida: 20 W

Potencia entrada RF: 1W

Potencia salida RF: 10 W

-Se pide:

Eficiencia de drenador (de potencia)

Eficiencia de potencia añadida (PAE)

Ganancia en potencia (en lineal y dB)

# Amplificadores de Potencia

## ■ Solución Ejercicio ejemplo de cálculo de eficiencia:

- Datos:

Potencia DC consumida: 20 W

Potencia entrada RF: 1W

Potencia salida RF: 10 W

-Solución:

Eficiencia de drenador (de potencia)= $10/20=0.5 \rightarrow 50\%$

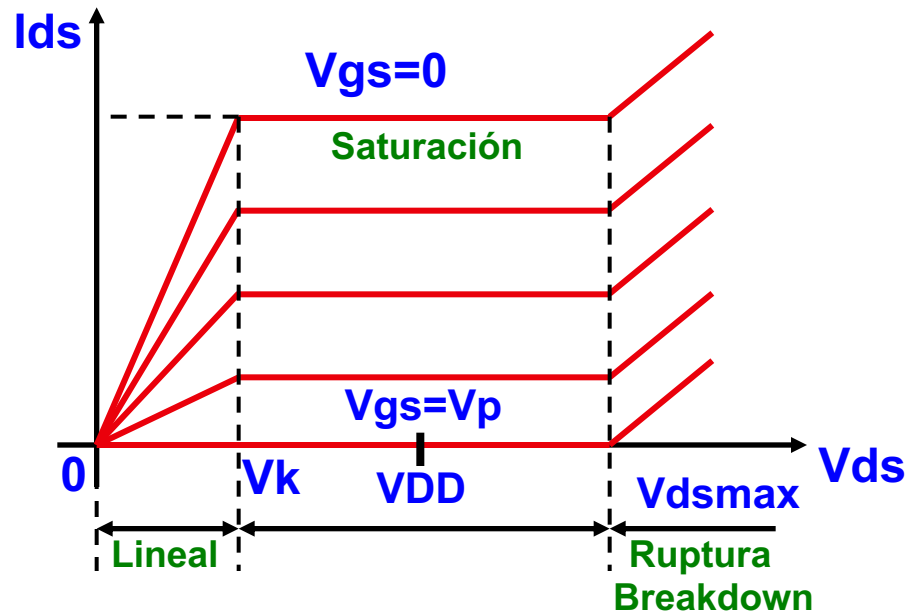
Eficiencia de potencia añadida (PAE)= $(10-1)/20=0.45 \rightarrow 45\%$

Ganancia en potencia (en lineal)  $10/1=10$  (en dB)= $10\log(10)=10$  dB

# Amplificadores de Potencia

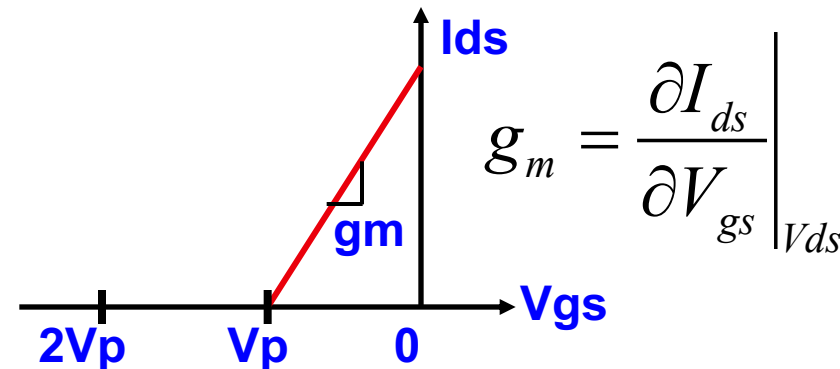
## Curvas características de un transistor FET ideal

### Zonas de funcionamiento.



- Zonas de funcionamiento: Lineal, Saturación y Ruptura (Breakdown).
- $V_k \rightarrow$  Tensión de codo (Knee).
- $V_{dsmax} \rightarrow$  Máxima tensión de drenador antes del Breakdown.
- $V_p \rightarrow$  Tensión de pinch-off: Tensión por debajo de la cual no hay corriente de drenador.

- $I_{ds}(V_{gs})$  para  $V_{ds}=\text{Cte}$ .
- $g_m \rightarrow$  Transconductancia (pendiente de la curva).
- $g_m \rightarrow$  Relacionada con la ganancia del transistor.



# Amplificadores de Potencia Material Adicional

- Video tutorial sobre diseño básico de amplificadores de potencia:
  - [https://youtu.be/WAingaHfBMs?si=\\_FvxbIhjf4\\_0MIDY](https://youtu.be/WAingaHfBMs?si=_FvxbIhjf4_0MIDY)
- Videos sobre el concepto del punto de compresión 1 dB y intercepción de 3<sup>o</sup> orden (IP3):
  - <https://youtu.be/30dWNYNzjfl?si=zUSFI2bSBUJXuZBu>
  - [https://youtu.be/m-2H8ddSwTI?si=VXV9leh\\_VYc3tkmj](https://youtu.be/m-2H8ddSwTI?si=VXV9leh_VYc3tkmj)