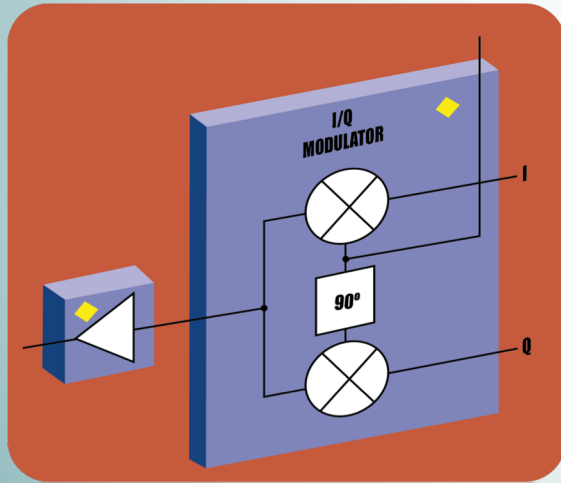


# Electrónica de Radiofrecuencia

## TEMA 4. AMPLIFICADORES DE POTENCIA

### 4.2. CLASES DE OPERACIÓN EN AMP. DE MICROONDAS



**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/)



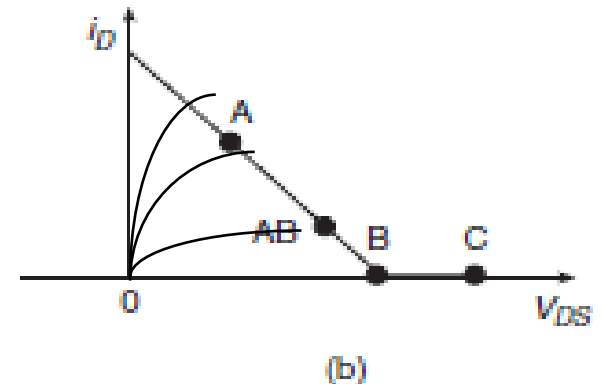
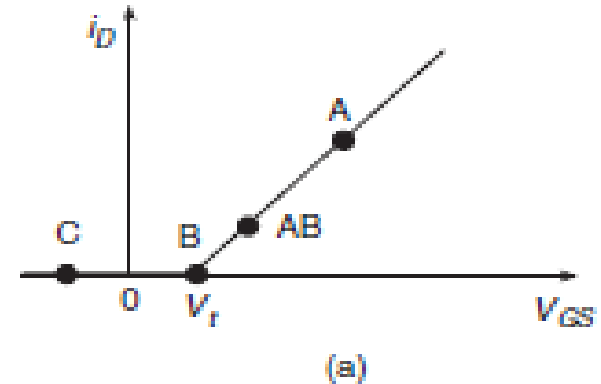
# Amplificadores de Potencia

## TEMA 4 – Amplificadores de Potencia

### Parte 2 - Clases de Operación en Amp. de Microondas

#### Contenidos:

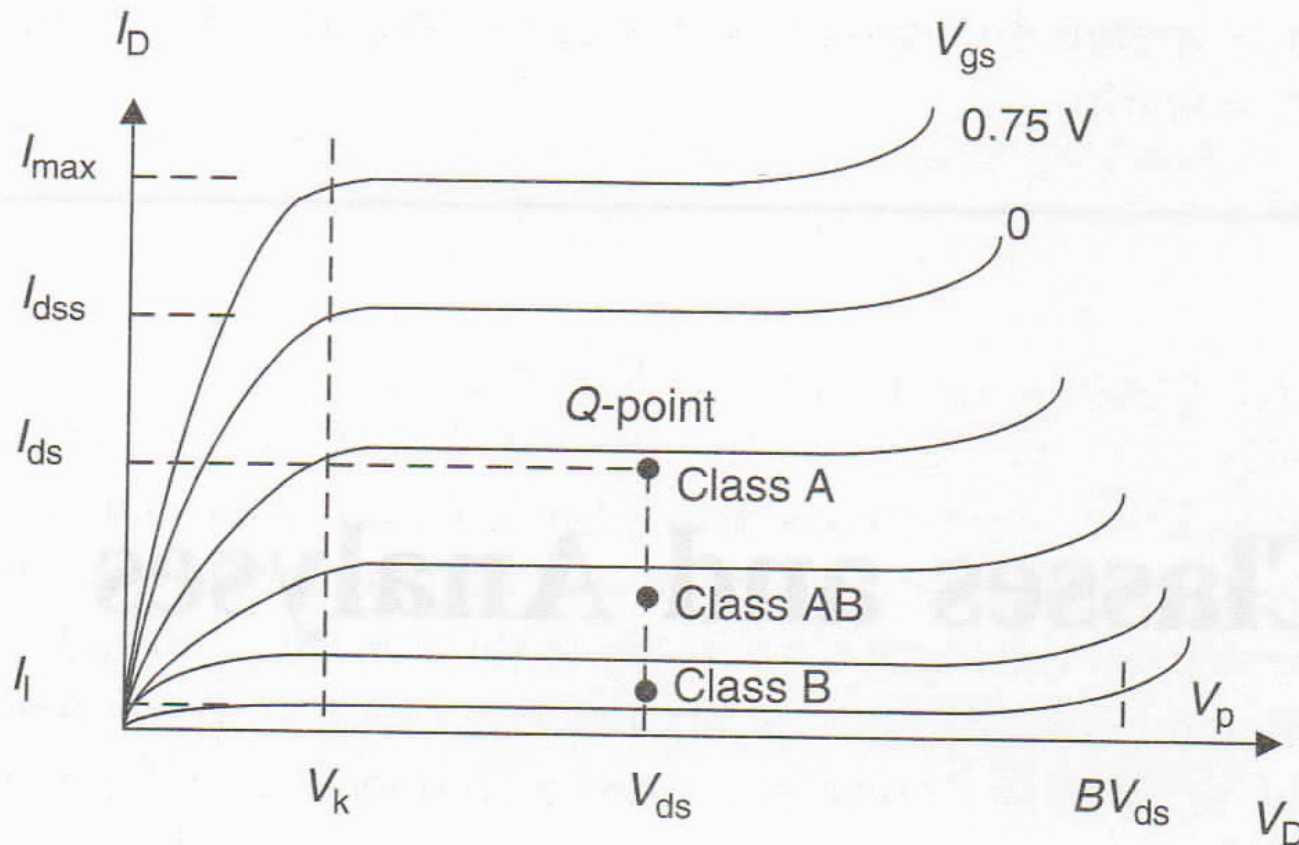
- **Clases de Operación**
- **Amplificadores Clase-A**
  - Amplificadores a FET
  - Amplificadores a BJT
- **Amplificadores Clase-B**
  - Amplificadores a FET
  - Amplificadores a BJT
- **Amplificadores Clase-AB**
- **Amplificadores Clase-C**
  - Amplificadores a FET Clásicos



# Amplificadores de Potencia

## Clases de Operación de Amplificadores de Potencia (1)

Posición Punto Quiescente\* (Q) (DC) en clases de Operación A, AB y B

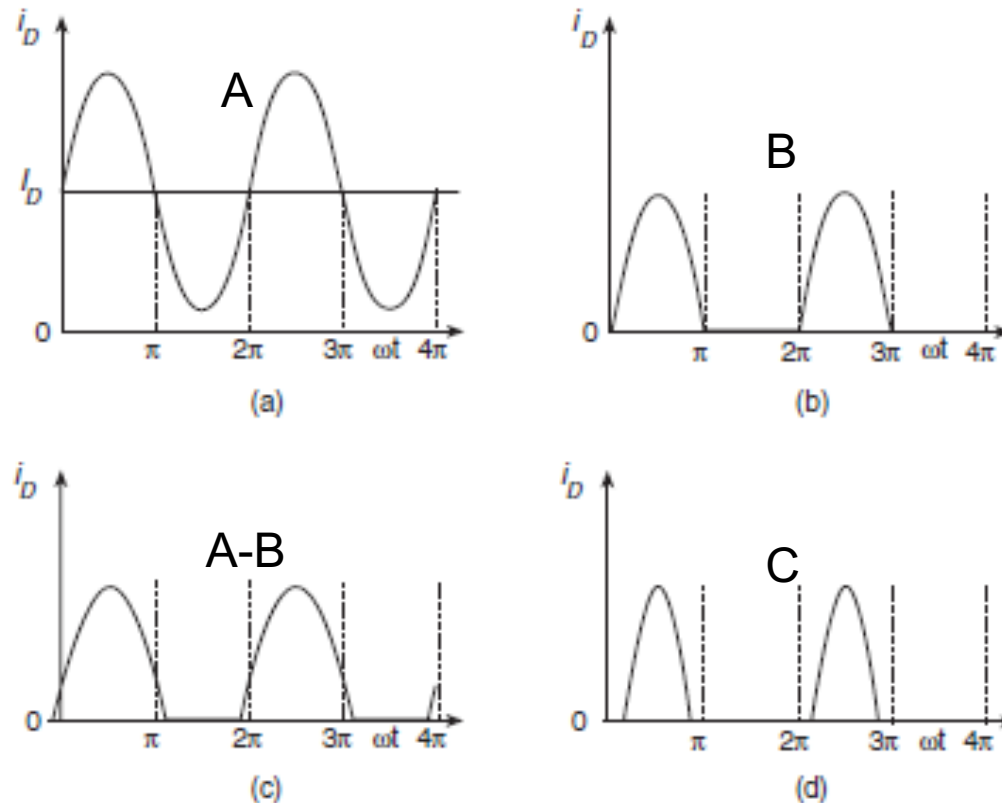


\* Que está quieto pudiendo tener movimiento propio. Real Academia Española .

# Amplificadores de Potencia

## Clases de Operación de Amplificadores de Potencia (2)

Formas de onda de la corriente  $i_D$  en clases de Operación A, B, AB y C



**Figure 1.3** Waveforms of the drain current  $i_D$  in various classes of operation. (a) Class A. (b) Class B. (c) Class AB. (d) Class C.

# Amplificadores de Potencia

## Clases de Operación de Amplificadores de Potencia (3)

Clases de Operación: Se denominan A, B, C, D, E, F, G, H, J, S

- Se diferencian:
  - Principio de operación.
  - Topología.
  - Eficiencia y linealidad.
  - Capacidad de producir potencia.
  
- Tres principales clases de amplificadores **lineales**: A, AB y B.  
Clase A → Más lineal y menos eficiente.
- A, AB, B y C → Comportamiento de fuente de corriente dependiente
  - Más comúnmente empleados en transmisores SSB ó AM → La información es transmitida (al menos parcialmente) en la amplitud de la señal de RF → Importante preservar la envolvente.
  
  - Linealidad → Parámetro más importante.

# Amplificadores de Potencia

## Clases de Operación de Amplificadores de Potencia (4)

- Clases de amplificadores **no lineales**: C, D, E, F, G, H, J y S

**Amplificadores auto-alimentados (fuente de corriente).**  
**Amplificadores tipo conmutador (switch).**

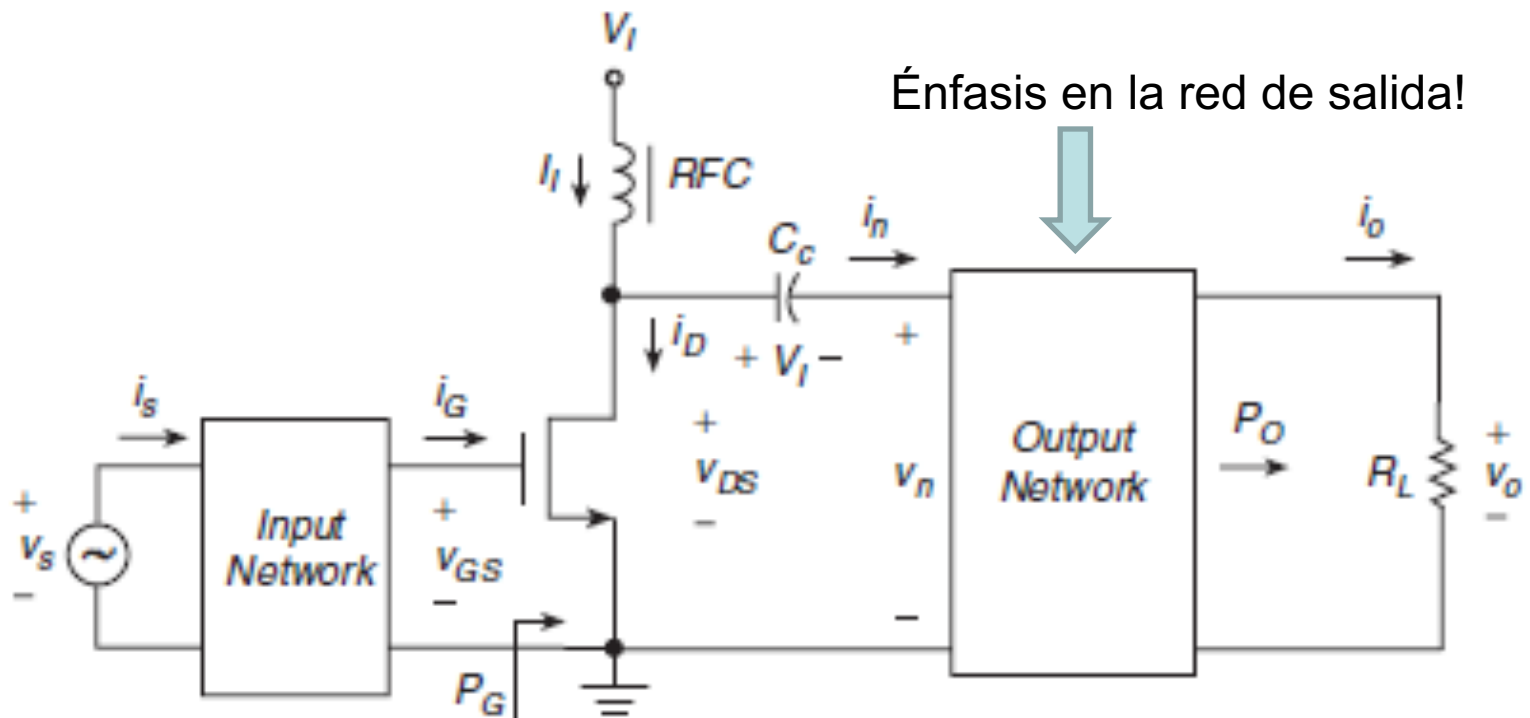
- Amplificadores Clase C:

- Topológicamente similar a los amp. Clase A.
- Diferencia en la zona de las curvas I-V del punto de polarización.
- Niveles de distorsión considerables.

# Amplificadores de Potencia

## Clases de Operación de Amplificadores de Potencia (5)

### Amplificador de Potencia: diagrama de bloques

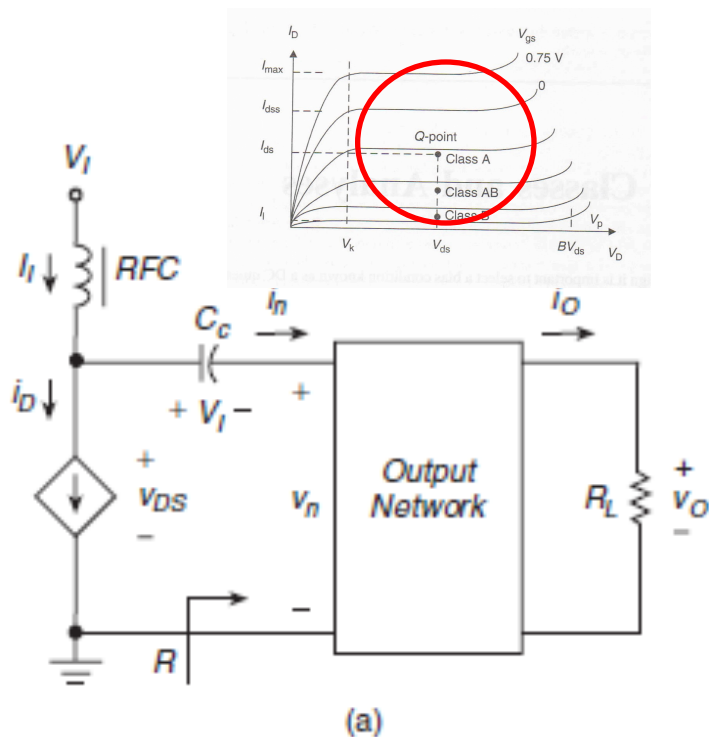


Ejemplo: transistor NMOS

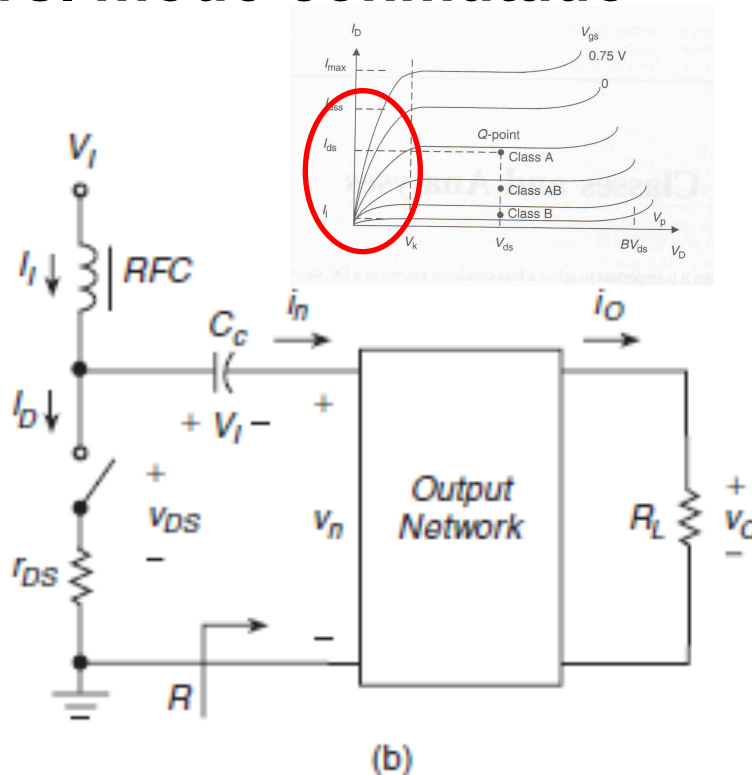
# Amplificadores de Potencia

## Clases de Operación de Amplificadores de Potencia (6)

### Modo fuente de corriente vs. modo conmutado



$i_{ds}=f(v_{gs}), i_{ds} \neq 0, v_{ds} \neq 0$

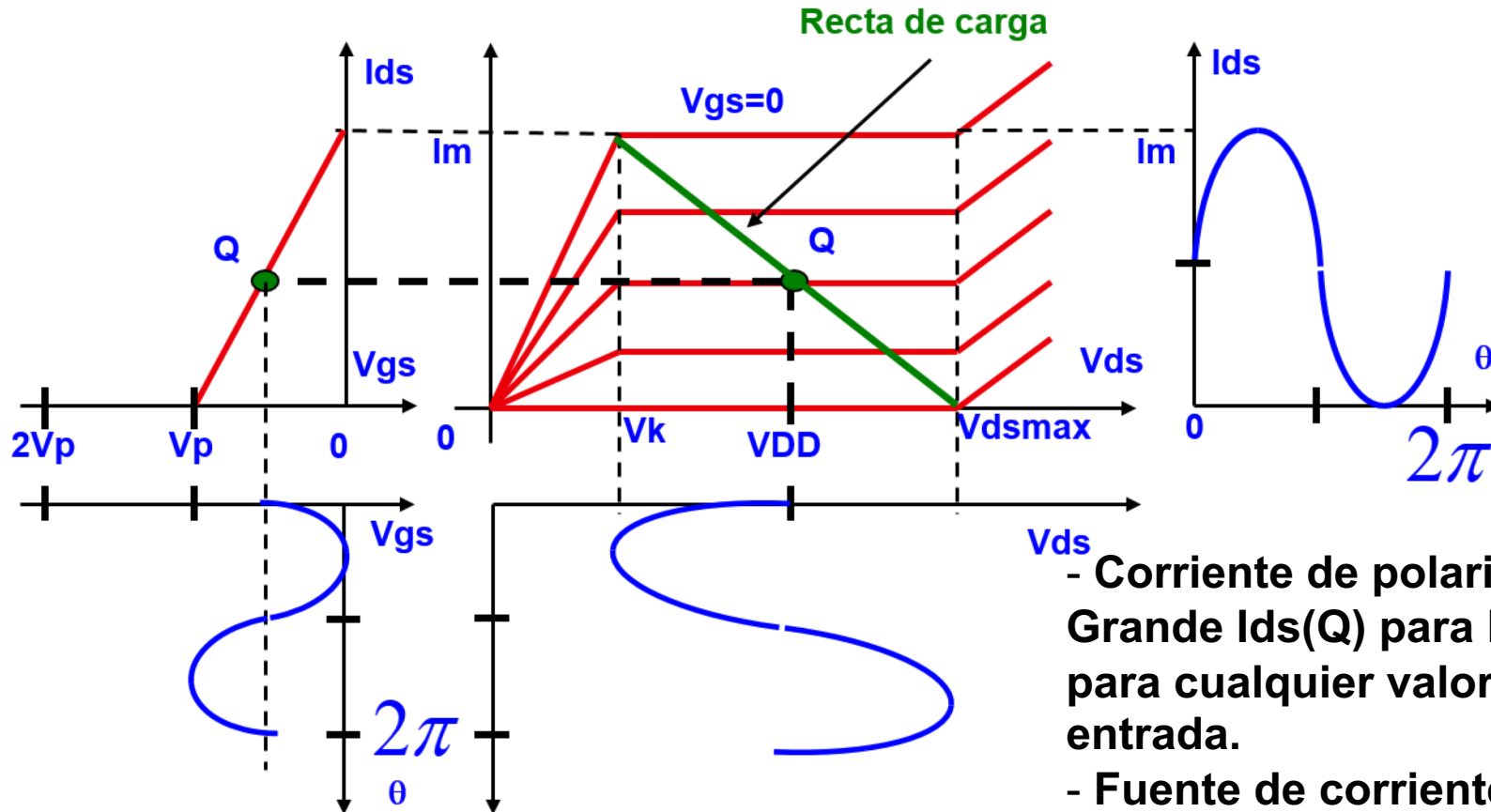


$R_{on}: i_{ds} \neq 0 \text{ y } v_{ds} = 0$   $R_{off}: i_{ds} = 0 \text{ y } v_{ds} \neq 0$   
 Mínima disipación, Máxima eficiencia

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-A con FET(1)

-A priori es la clase de operación que proporciona mayor linealidad: La forma de onda de salida es una réplica de la de entrada. Conducción todo el ciclo.

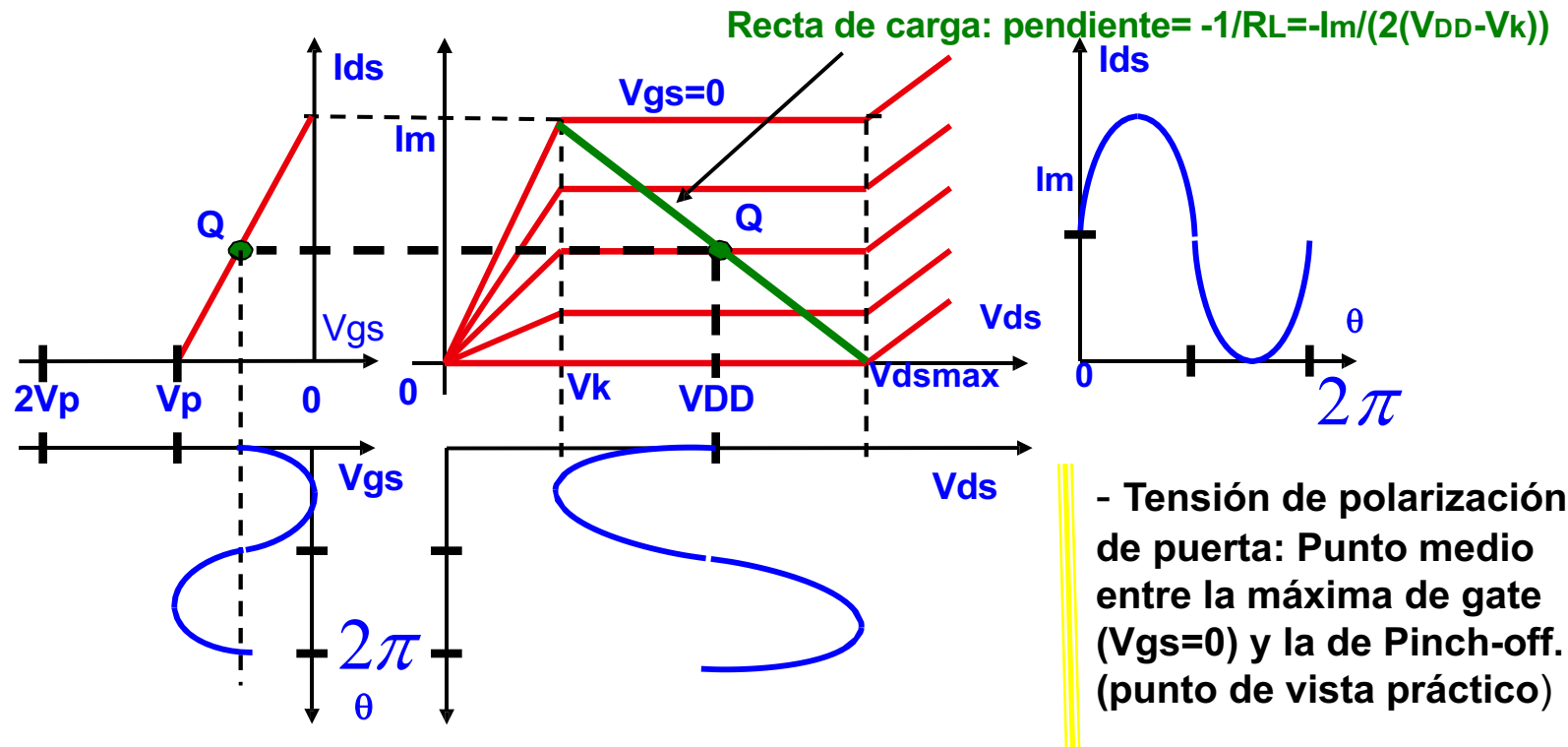


- Corriente de polarización  $\rightarrow$  Grande  $I_{ds}(Q)$  para FET activo para cualquier valor de RF de entrada.
- Fuente de corriente controlada por dicha tensión de entrada.
- Angulo Conducción  $\cdot 2\theta = 2\pi$

\*Angulo de conducción:  
fracción del periodo en ángulo, en la que el dispositivo conduce

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-A con FET (2)

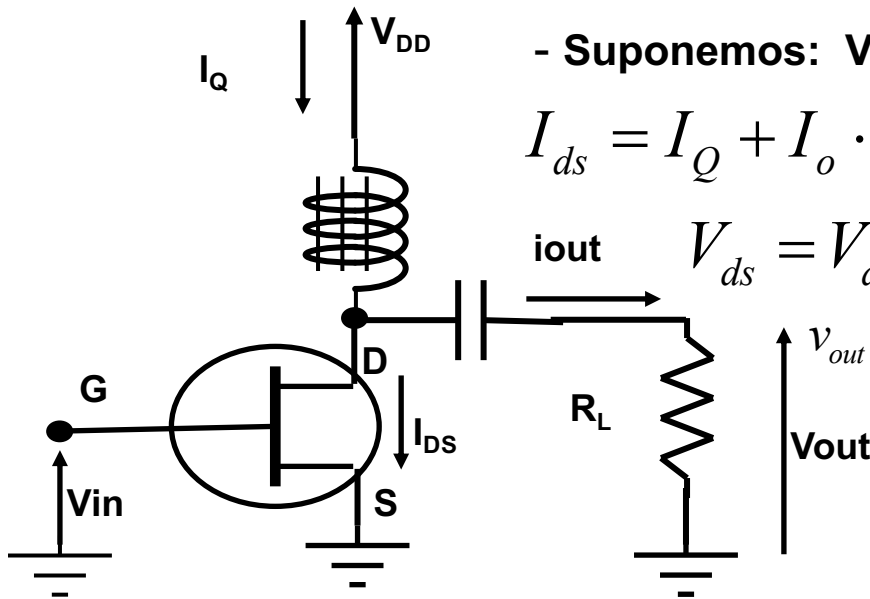


- Polarización drenador:  $V_{ds}(Q) = V_{DD}$  Punto medio entre  $V_{dsmax}$  y  $V_k$  (knee).
- Señal de entrada en puerta sinusoidal ( $V_{gs}$ ) → Tensión y corriente a la salida ( $V_{ds}$ ,  $I_{ds}$ ) son idealmente sinusoidales.
- Tensión de salida  $V_k < V_{ds} < V_{dsmax}$  (Breakdown). Valor medio DC:  $V_{DD}$ .
- Potencia media DC constante independientemente de la potencia de entrada de RF.
- Máxima potencia de salida → Limitada entre  $V_{dsmax}$  y la máxima corriente  $I_{ds}$  ( $V_{gs}=0$ ).

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-A con FET (3)

- Configuración Amp. Clase-A (sin redes de adaptación ni sintonía).



- Suponemos:  $V_{in} \rightarrow$  señal sinusoidal a la entrada de frecuencia  $f_0$

$$I_{ds} = I_Q + I_o \cdot \text{sen}(\omega_0 \cdot t) \quad i_{out}(t) = -I_o \cdot \text{sen}(\omega_0 \cdot t)$$

$$V_{ds} = V_{ds}(DC) + v_{ds}(AC) = V_{DD} - V_o \cdot \text{sen}(\omega_0 \cdot t)$$

$$v_{out}(t) = -V_o \cdot \text{sen}(\omega_0 \cdot t) \quad \text{Notar cambio fase } I_{ds} - V_{ds}$$

$I_Q \rightarrow$  Corriente DC en el punto de trabajo.

$V_o = R_L \cdot I_o \Rightarrow$  Tensión de salida en la resistencia de carga (desacoplo: solo AC).

- Condición de máxima potencia de salida de forma lineal (ideal sin efectos L/C parásitos):

Excursión de entrada: pinch-off (corte)  $\leftrightarrow$  saturación (máxima corriente)

- Relación tensión y corriente  $\rightarrow$  Recta de Carga:  $V_{ds \max} - V_{ds} = I_{ds} \cdot R_L$

En particular:  $V_{ds \max} - V_{DD} = V_{DD} - V_k = I_Q \cdot R_L$

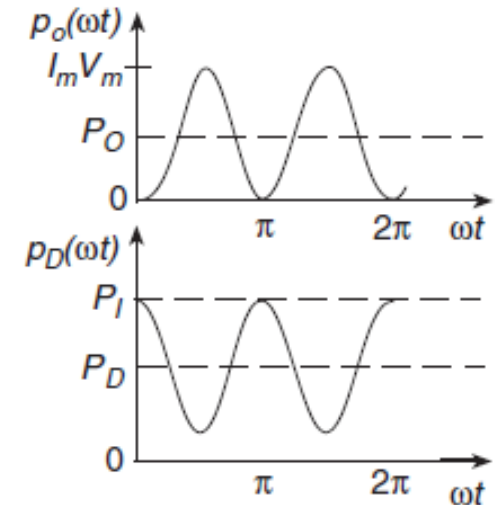
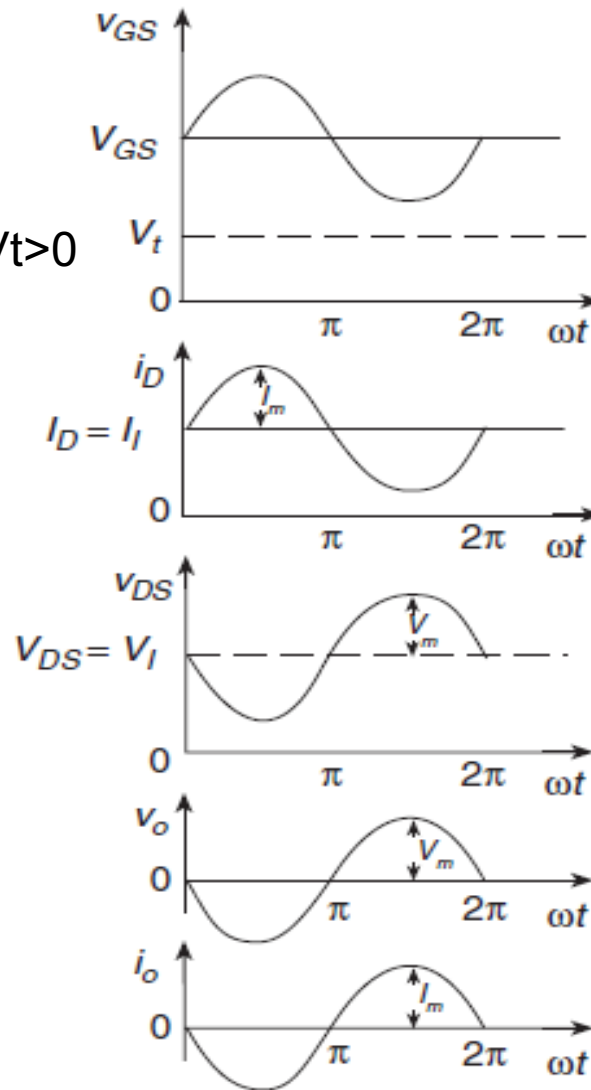
$$R_L = 2(V_{DD} - V_k) / I_m$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-A con FET (4)

### - Formas de Onda

Ejemplo con CMOS  $V_p = V_t > 0$

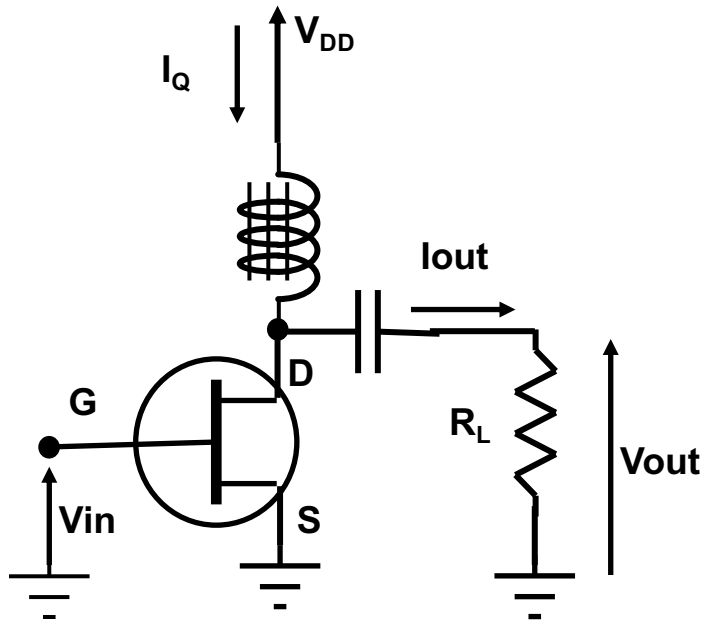


Potencias instantaneas

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-A con FET (4)

- Cálculo de la Eficiencia:



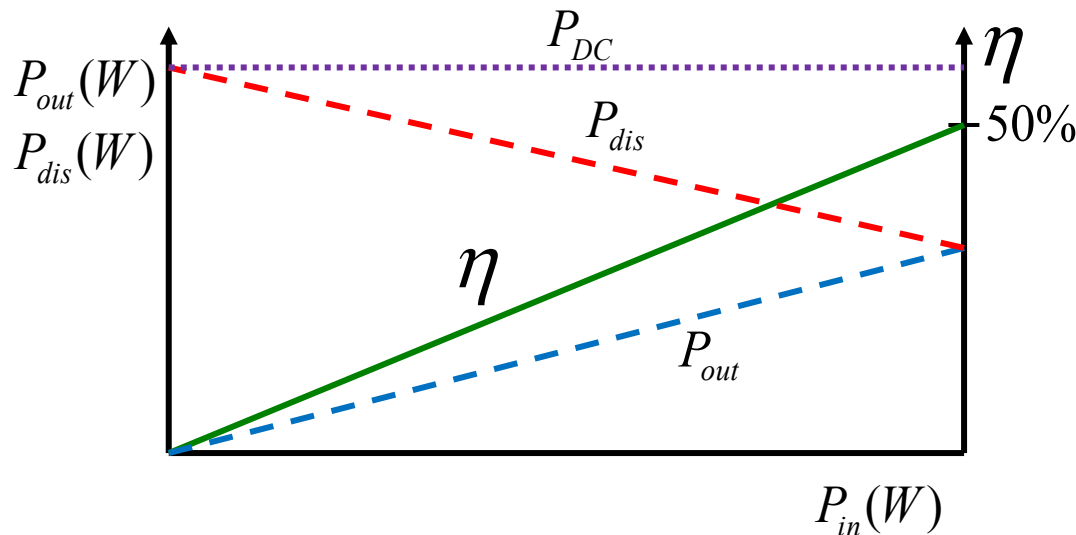
$$\left. \begin{aligned} P_{RF} &= \frac{V_o \cdot I_o}{2} = \frac{V_o^2}{2 \cdot R_L} \\ P_{DC} &= V_{DD} \cdot I_Q = V_{DD} \frac{(V_{DD} - V_k)}{R_L} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \left\{ \eta = \frac{P_{RF}}{P_{DC}} = \frac{V_o^2}{2 \cdot V_{DD} \cdot (V_{DD} - V_k)} \right.$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-A con FET (5)

### PROPIEDADES:

- 1.- Señales de amp. Cte.: Máxima eficiencia 50% → Caso  $V_k=0$ ,  $V_{out}=V_{DD}$  → La eficiencia varía entre 0% ( $V_{in}=0$ ) y 50% manteniendo linealidad salida-entrada.
- 2.- Señal de entrada no permite el nivel máximo → Disminución de la eficiencia → limitación, por ejemplo, para señales moduladas en amplitud.
- 3.- Potencia disipada ( $P_{dis} = P_{in} + P_{DC} - P_{out}$ ) aumenta al disminuir la  $P_{out}$  → Máxima disipación de Potencia se corresponde con  $P_{out}=0=P_{in}$  →  $P_{dis}$  coincide con  $P_{DC}$ .



- 4.- Amplificadores Clase A de respuesta lineal:
  - a) Señales moduladas AM de bajo nivel.
  - b) Señales multitono/banda ancha de baja intermodulación de tercer orden.

# Amplificadores de Potencia

## Ejemplo clase A

- Transistor FET con  $V_{\text{breakdown}}=V_{\text{dsmax}}=20\text{ V}$ ,  $I_{\text{max}}=I_{\text{m}}=2\text{ A}$  se polariza a  $I_{\text{max}}/2$  y  $V_{\text{ds}}=10\text{ V}$  y se opera en clase A @ 1 GHz. Se desprecia  $V_{\text{knee}}$ . El amplificador tiene alta ganancia (despreciamos  $P_{\text{in}}$ ) y una potencia de salida  $P_{\text{out}} = 5\text{ W}$ . Comprobar  $P_{\text{out}}$ . Calcular  $R_{\text{L}}$  óptima, la potencia disipada  $P_{\text{dis}}$  y la eficiencia de drenador.

# Amplificadores de Potencia

## Ejemplo clase A (Solución)

- Transistor FET con  $V_{\text{breakdown}}=V_{\text{dsmax}}=20\text{ V}$ ,  $I_{\text{max}}=I_m=2\text{ A}$  se polariza a  $I_{\text{max}}/2$  y  $V_{\text{dd}}=10\text{ V}$  y se opera en clase A @ 1 GHz. Se desprecia  $V_{\text{knee}}$ . El amplificador tiene alta ganancia (despreciamos  $P_{\text{in}}$ ) y una potencia de salida  $P_{\text{out}} = 5\text{ W}$ . Comprobar  $P_{\text{out}}$ . Calcular  $R_L$  óptima, la potencia disipada  $P_{\text{dis}}$  y la eficiencia de drenador.

$$P_{DC} = 10 \times 1 = 10\text{ W}$$

$$V_{\text{out max}} = V_{\text{dd}}$$

$$P_{\text{out max}} = 5\text{ W} = \frac{1}{2} \frac{I_m}{2} V_{\text{dd}}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{DC}} = \frac{5}{10} = 0.5 = 50\%$$

$$R_L = \frac{V_{\text{out max}}^2}{2P_{\text{out max}}} = \frac{10 \times 10}{2 \times 5} = 10\Omega$$

$$R_L = \frac{2V_{\text{dd}}}{I_{\text{max}}} = \frac{2 \times 10}{2} = 10\Omega$$

$$P_{\text{dis}} = P_{\text{dc}} - P_{\text{out}} = 10 - 5 = 5\text{ W}$$

# Amplificadores de Potencia

## Propiedades Amplificadores Clase-A (1)

- Potencia disipada en el dispositivo en Clase-A → Al menos el 50% de la de alimentación.
- Consideraciones de diseño térmico para disipación del calor (inclusión de radiadores/disipadores).

---

- En la práctica siempre hay componentes armónicas → No linealidad inherente a los dispositivos activos → Usualmente deben ser eliminados.

- Dos soluciones:

- a) Escogiendo una red de adaptación de salida adecuada (Diseño paso bajo).
- b) Adaptando a  $f_0$  y filtrando posteriormente de forma separada.

# Amplificadores de Potencia

## Propiedades Amplificadores Clase-A (2)

- Reducción de la eficiencia:

a) Efecto sobre la eficiencia de las componentes armónicas →  
→ Despreciable (menor que 1/100).

b) Dispositivos prácticos → Tensión de saturación finita →  
Reducción de la eficiencia.

- Máxima excursión de la tensión de colector (BJTs):

$$V_{sw} = V_{CC} - V_{SAT}$$

- Máxima eficiencia para Amp. Clase-A (BJTs):

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{V_{\max}^2}{2 \cdot V_{CC}^2} \Rightarrow \eta_{\max} = \frac{V_{sw}^2}{2 \cdot V_{CC}^2}$$

-Dispositivos MOS → Existe un efecto equivalente en saturación ó resistencia “ON”. El máximo voltaje “swing”, en este caso, se demuestra que es:

$$V_{sw} = \frac{R_L}{R_L + 2 \cdot R_{on}} \cdot V_{DD}$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B

**-OBJETIVO:** Diseño de amp. RF clase AB, B o C es aumentar la eficiencia polarizando en un punto de operación de menos corriente, siendo la señal de RF la que introduce al transistor en la zona de conducción.

- Técnica data del tiempo de los tubos de vacío.

**- Amplificador Clase B →** Punto de operación en un extremo de la característica del transistor → Potencia consumida en reposo muy pequeña.

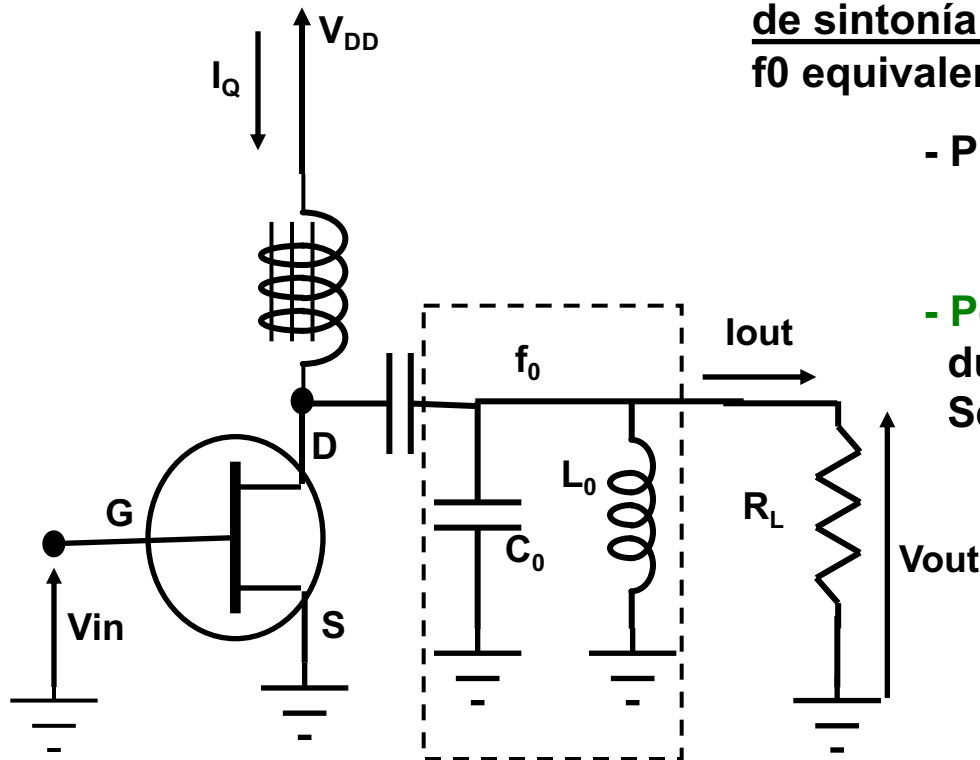
- Corriente o tensión de reposo de un Clase-B es prácticamente cero → Amplifica medio ciclo de cada ciclo.

- Clase- B es significativamente más eficiente que la Clase-A mientras proporciona niveles aceptables de linealidad si se filtra bien la salida.

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (1)

- **Punto de vista del diseño:** Circuito amplificador clase B es similar a un clase A. Generación armónicos: necesario un circuito resonante de sintonía en la carga (resonancia L-C paralelo: open @  $f_0$  equivalente a filtro paso banda @  $f_0$ ).



- Principal diferencia con clase A:  
**Punto de polarización.**

- **Polarización de puerta** → Sitúa al transistor durante medio ciclo de RF en pinch-off → Señal rectificadora media onda.

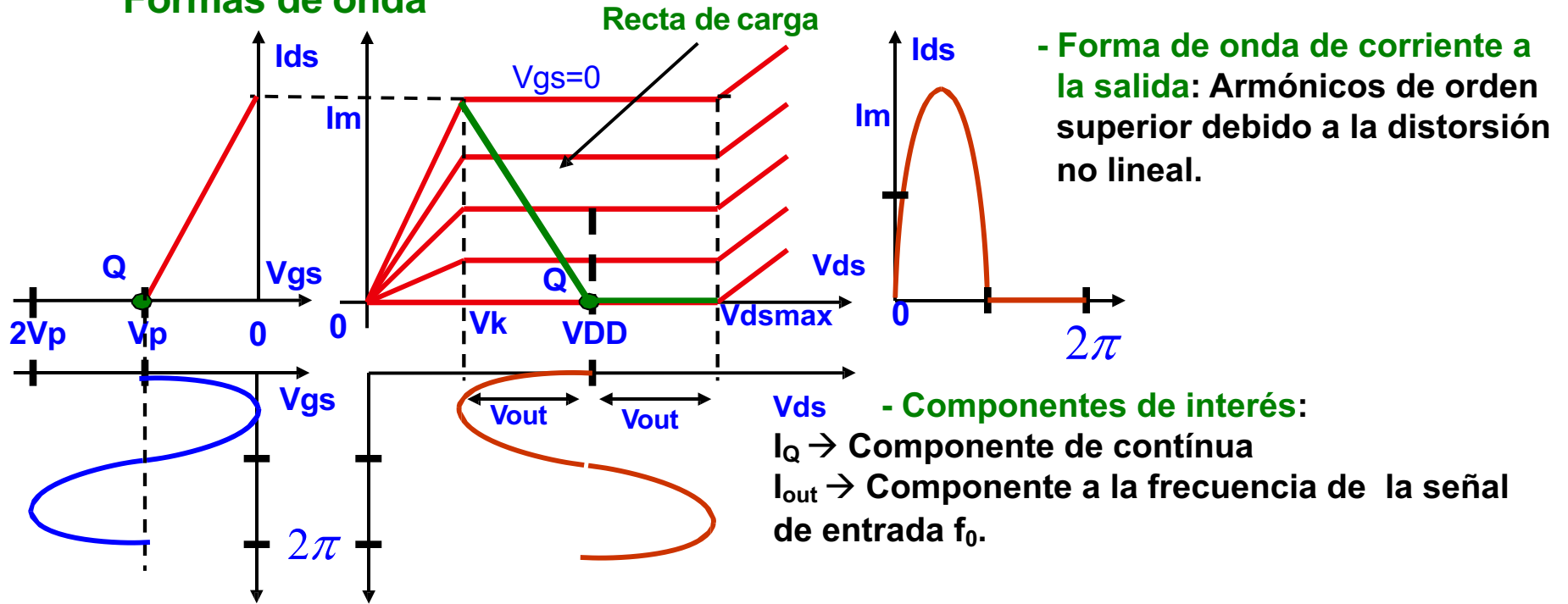
$$V_{gsQ} \approx V_p$$

- Ángulo de conducción  $2\theta = \pi$
- Contando solo el semiperiodo de conducción → Puede considerarse que la salida es proporcional a la entrada.

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (2)

### Formas de onda



- Componente  $I_{out}$  → Se obtiene a través del circuito resonante  $L_0C_0$ . Filtro que solo deja pasar  $f_0$ .

- Tensión de salida: 
$$V_{out} = I_{out} \cdot R_L$$

- Componentes a la salida → Dependen del factor de calidad del circuito  $L_0C_0$ .

- De forma ideal sólo aparece la frecuencia  $f_0$ . DC se elimina con un condensador

# Amplificadores de Potencia

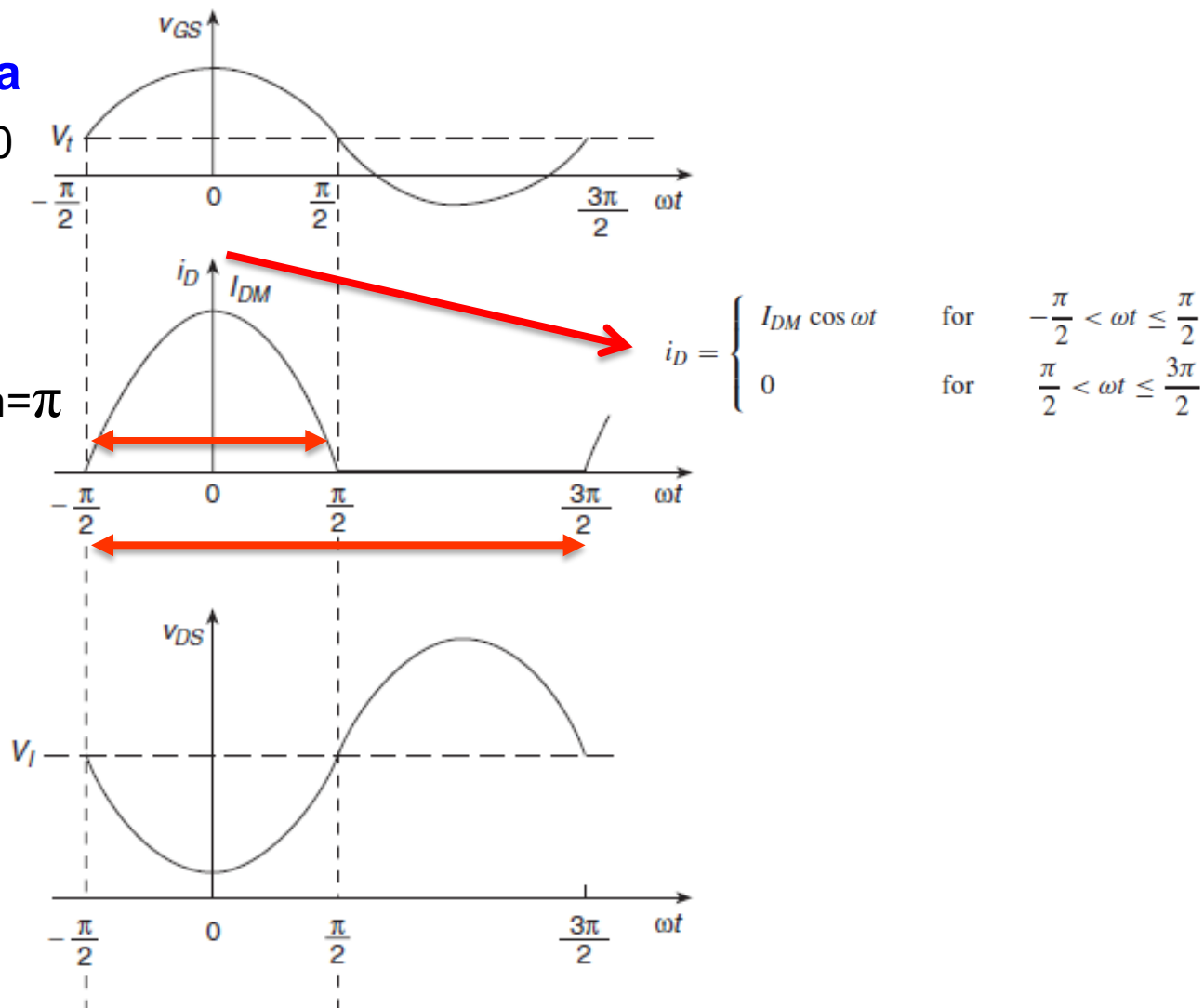
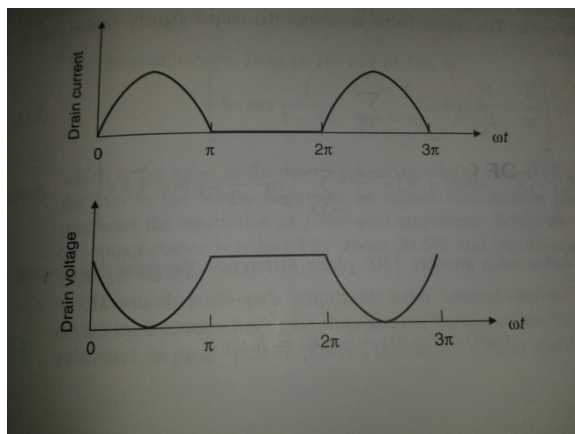
## Amplificadores Clase-B con FET (3)

### - Formas de Onda

MOSFET con  $V_p \sim V_t > 0$

Notar ángulo de conducción =  $\pi$

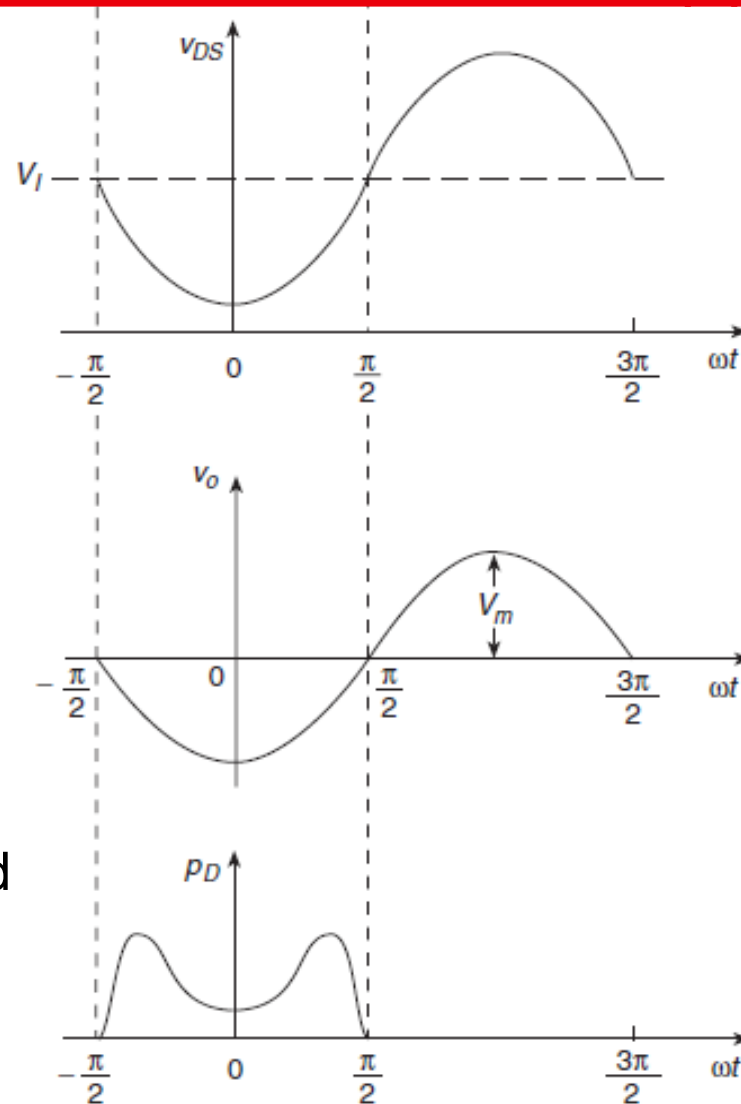
\*Formas de onda sin resonador de salida



# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (4)

### - Formas de Onda



$$V_{out} = I_{out} \cdot R_L$$

Potencia disipada =  $v_{ds} \times i_d$   
Se anula medio ciclo

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (5)

### PROPIEDADES:

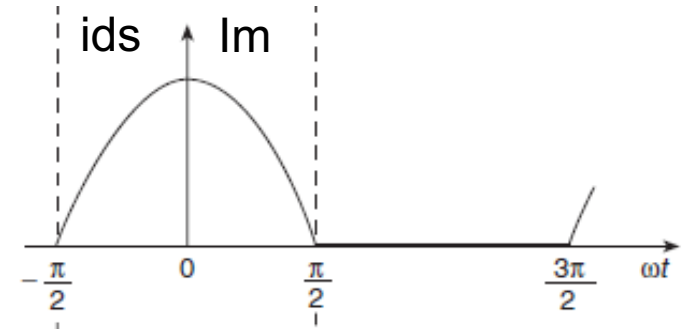
- Dada una recta de carga en una polarización clase B → El transistor se mantiene en pinch-off medio ciclo con tensión de salida Drenador-Fuente superior a la polarización  $V_{DD}$  → energía almacenada en el circuito res.  $L_0C_0$ .
- En el semiciclo activo la corriente aumenta hasta tomar valores próximos al máximo y la tensión valores mínimos → Limitados por el nivel de distorsión al final de la zona lineal (límite  $V_{knee}$ ).
- Punto de polarización en ausencia de RF → Corriente DC nula.
- Consumo de potencia de DC aumenta al incrementar el nivel de potencia de la señal de entrada (promedio semiciclo cortado / semiciclo conduciendo).

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (6)

- Corriente de drenador ( $\theta = \omega t$ )

$$i_{ds} = \begin{cases} I_m \cos(\theta) & -\pi/2 < \theta < \pi/2 \\ 0 & \pi/2 < \theta < 3\pi/2 \end{cases}$$



A partir de  $i_{ds}$  hallaremos:

- su componente DC (promedio en todo un ciclo)  $I_Q$
- Potencia consumida en DC
- Componente fundamental de  $I_{out}$  (incluyendo efecto filtro resonante sintonía carga)
- Potencia entregada en RF a la carga a la frecuencia fundamental

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (7)

- Corriente de drenador en el punto de polarización  $I_Q$ : ( $\theta = \omega t$ )

$$I_Q = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\pi}^{+\pi} i_{ds} \cdot d\theta = \frac{I_m}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos(\theta) \cdot d\theta = \frac{I_m}{\pi}$$

- Potencia consumida en el punto de polarización:

$$P_{DC} = V_{DD} \cdot I_Q = \frac{V_{DD} \cdot I_m}{\pi}$$

- Corriente de salida de RF: Componente fundamental → Mitad del valor de la corriente máxima.

- Potencia de salida → Depende de la amplitud de la señal de entrada.
- Valor máximo de la tensión de salida →  $V_{DD} - V_k$

$$I_{out} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{+\pi} i_{ds} \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta = \frac{I_m}{\pi} \cdot \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos^2(\theta) \cdot d\theta = \frac{I_m}{2}$$

Componente fundamental  
(coef. Fourier)

- Potencia de RF →  $P_{RF} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{2} = \frac{V_{out} \cdot I_m}{4}$  @ Componente fundamental

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (8)

### PROPIEDADES:

- Aunque el funcionamiento del transistor es claramente no lineal, puede considerarse que el comportamiento del amp. clase B es lineal → La amplitud de la componente fundamental de la corriente a través del circuito resonante LC y de la tensión **varían** de forma lineal con la amplitud máxima de la corriente de drenador o lo que es lo mismo con la señal de entrada.
- Para asegurar el comportamiento lineal → Ningún armónico caiga en la banda de operación del amplificador.
- Teniendo en cuenta que el primer armónico que aparece es el de segundo orden  $2f_0$  → Anchos de banda del amplificador menores de una octava aseguran que no aparezcan armónicos en la misma.

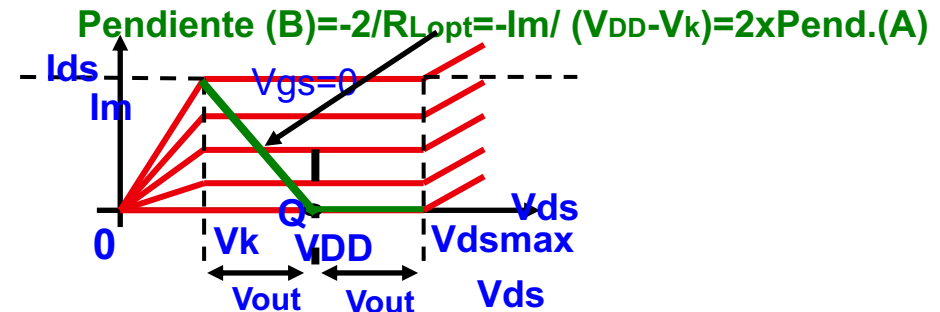
# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (9)

### PROPIEDADES:

- Distorsión en la línea de carga intrínseca → generación de armónicos → necesidad de filtrado → pendiente línea de carga dispositivo ≠  $R_{Lopt}$  en la salida, después del filtro y a la frecuencia fundamental
- Diseño apropiado de un amplificador clase B → Requiere que la máxima corriente de pico coincida con la que se obtiene en el punto  $V_{knee}$  → Si se tiene en cuenta que la componente fundamental es  $I_m/2$  → Resistencia de carga óptima será:

$$R_{Lopt}(claseB) = \left( \frac{V_{DD} - V_k}{\frac{I_m}{2}} \right)$$



- Aunque la pendiente de la recta en clase A y en clase B no coinciden, la resistencia de carga óptima en clase B coincide con la resistencia de carga óptima del amplificador en clase A.

$$R_{Lopt}(claseA) = 2 \cdot \left( \frac{V_{DD} - V_k}{I_m} \right)$$

- “Perdidas por armónicos” →  $G(\text{clase B}) \approx G(\text{clase A})/4$

→ en dB:  $G(B) \approx G(A) - 6 \text{ dB}$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (10)

### EFICIENCIA:

- La eficiencia de un amplificador clase B aumenta con la potencia de salida.
- Límite teórico:  $V_{out} = V_{DD} \rightarrow$  Valor de la eficiencia =  $\pi/4 \sim 78\%$ .
- Recordamos:

$$P_{RF} = \frac{V_{out} \cdot I_m}{4}$$

$$P_{DC} = \frac{V_{DD} \cdot I_m}{\pi}$$

$$\eta = \frac{P_{RF}}{P_{DC}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{out}}{V_{DD}}$$

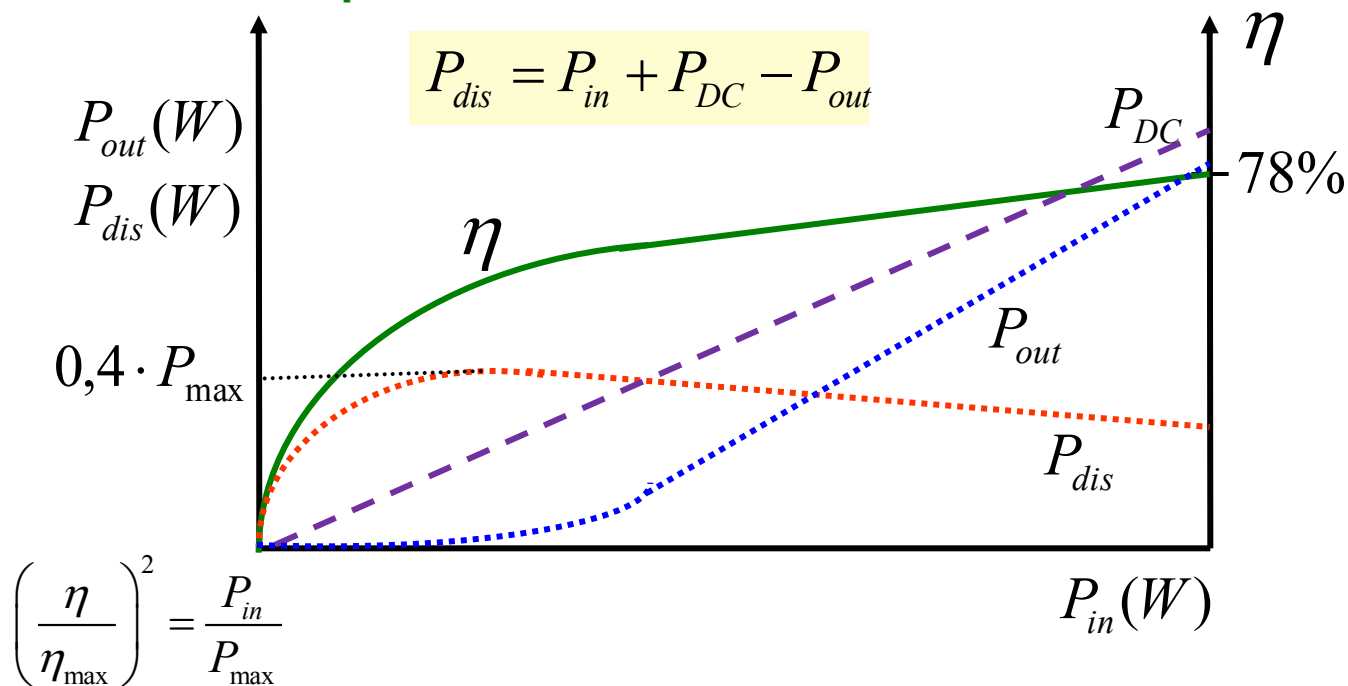
- Forma práctica de calcular la eficiencia  $\rightarrow$

$$\eta = \frac{P_{RF}}{P_{DC}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{DD} - V_k}{V_{DD}}$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-B con FET (11)

- Variación de la eficiencia y distintas potencias con la potencia de entrada en un amplificador clase B.



➤ **Propiedades:**

- Linealidad de la potencia de salida y aumento de rendimiento respecto al clase A.

- No hay consumo de pot. cuando no hay señal aplicada a la entrada. (Menor problema para disipación térmica).

-  $P_{dis}$  es una función de  $P_{in}$  (derivada=0 → máximo)

- Valor máximo de  $P_{dis}$  →  $P_{dis\ max} = \frac{4}{\pi^2} P_{out\ max} \approx 0,4 \cdot P_{out\ max}$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-AB (1)

### PROPIEDADES:

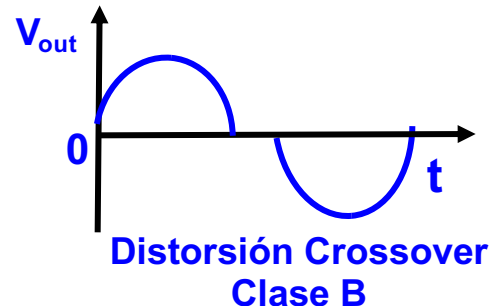
- Es un compromiso en términos de linealidad y eficiencia entre las clases de operación A y B.
- Se polariza el transistor tan cerca de pinch-off como sea posible → 10 ó 15 % de la corriente de saturación del dispositivo.
- El transistor se encuentra activo más de medio ciclo de la señal de RF sin llegar a estar activo durante un ciclo completo.
- Distorsión añadida por un amplificador Clase-AB mayor que un Clase-A y menor que en un Clase-B.
- Eficiencia menor que un Clase-B y mayor que un Clase-A.
- El nivel de mejora o degradación de la distorsión depende del nivel de alimentación aplicada (standing bias).

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase-AB (2)

### PROPIEDADES:

- Se pueden obtener buenos niveles de funcionamiento con “standing bias” modestos en configuración push-pull → Diseños muy utilizados en amp. de alta potencia, tanto para audio como para RF.
- Amp. Clase-B → Importante distorsión cruzada (Crossover) debido a una transición imperfecta (no lineal) de corte a modo activo.
- Transición Corte-Activo → Usualmente acompañada de una tensión offset
- Efectos que se traducen en una porción plana observada en transición corte-activa.



- Habitualmente la mejora en linealidad es más importante que el sacrificio en eficiencia.

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase C

### PROPIEDADES:

- Clases de operación A, AB y B se consideran lineales → Amplitud y fase de la señal de salida están linealmente relacionadas con las de la señal de entrada.
- En las clases de operación no lineales (C, D, E y F): Preferencia de la eficiencia frente a la linealidad.
- Punto de vista circuital: Amplificador clase C no difiere del clase B. La diferencia fundamental es el punto de operación.
- Clase C → Reducción del ciclo de conducción del transistor respecto al clase B. Polarización de tensión de puerta por debajo de pinch-off → Fuertemente cortado más de medio ciclo de la señal de entrada.
- Conducirá una porción de ciclo de RF menor de  $180^\circ$  (medio periodo) ( $\Theta < \pi/2$ ).
- Más adecuado para baja frecuencia de RF con modulaciones que no requieran estricta linealidad (CW, AM, FM, PM).

- Dos tipos de Amplificadores Clase-C:

**PA Clase-C Clásico** → Utilizado en aplicaciones a Válvulas y ahora con transistores MOSFET o FET en general.

**Clase-C Mixed Mode Stage** → Configuración que utiliza un BJT. Es analíticamente más complejo.

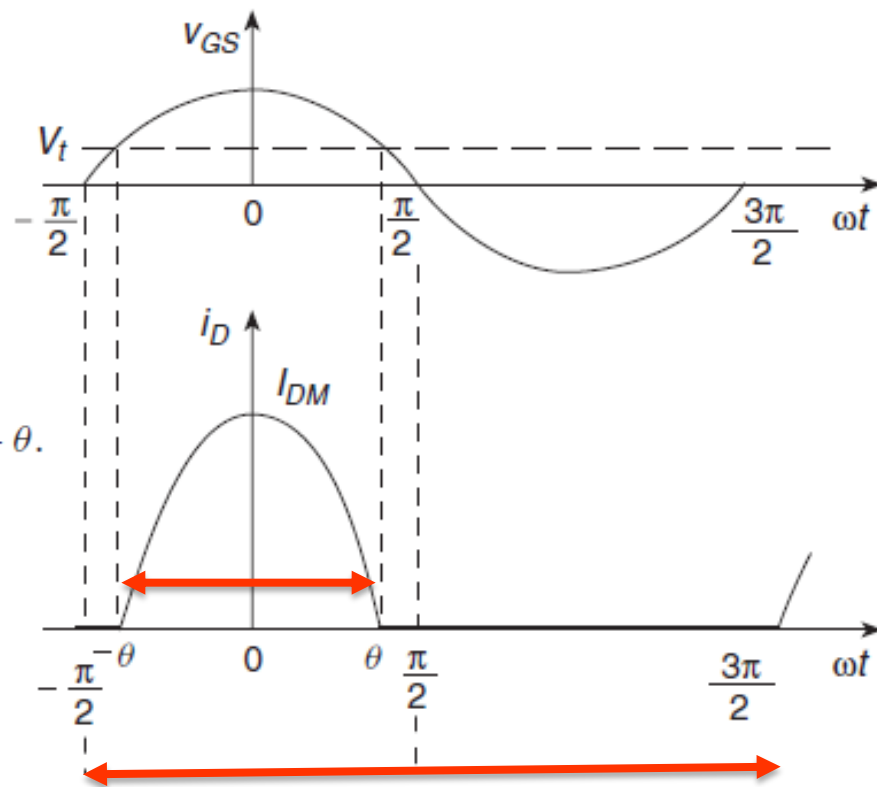
# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores Clase C

### - Formas de Onda

MOSFET con  $V_p \sim V_t > 0$

$$i_D = \begin{cases} I_{DM} \frac{\cos \omega t - \cos \theta}{1 - \cos \theta} & \text{for } -\theta < \omega t \leq \theta \\ 0 & \text{for } \theta < \omega t \leq 2\pi - \theta. \end{cases}$$



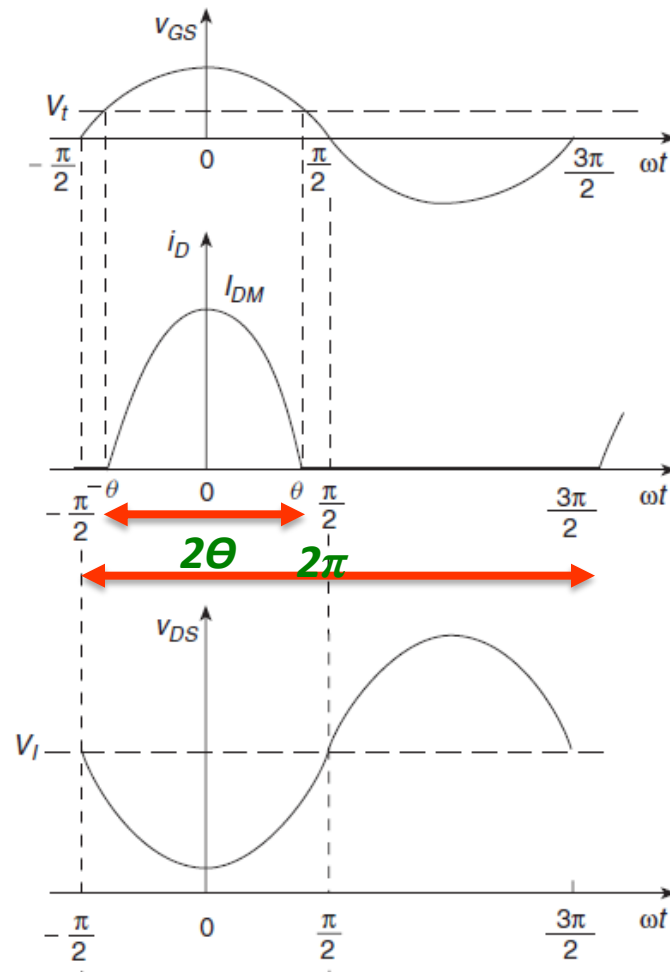
Expresión general común AB, B, y C, cambia según el ángulo de conducción  $\Theta$   
 $\theta : 0 \rightarrow \pi/2 : C ; \pi/2 : B ; \pi/2 \rightarrow \pi : AB ; \pi : A$

No confundir ángulo de conducción  $\Theta$ , con fase  $\theta = \omega t$ !

# Amplificadores de Potencia

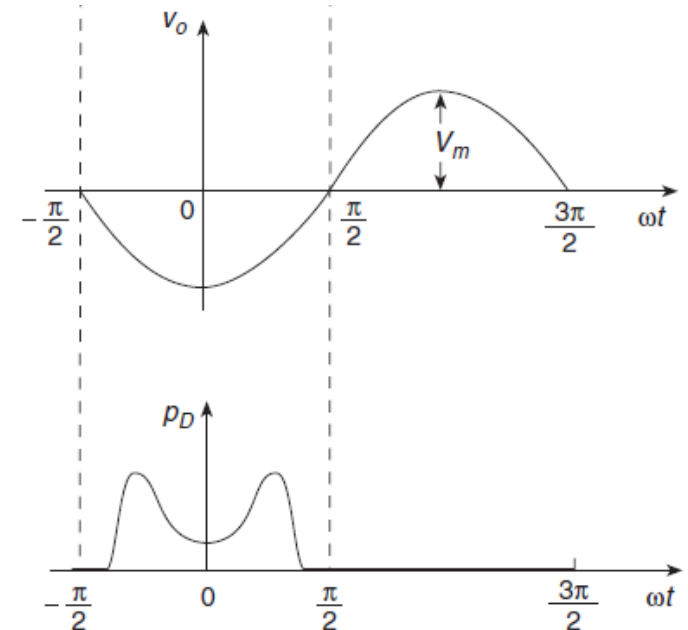
## Amplificadores Clase C

### - Formas de Onda



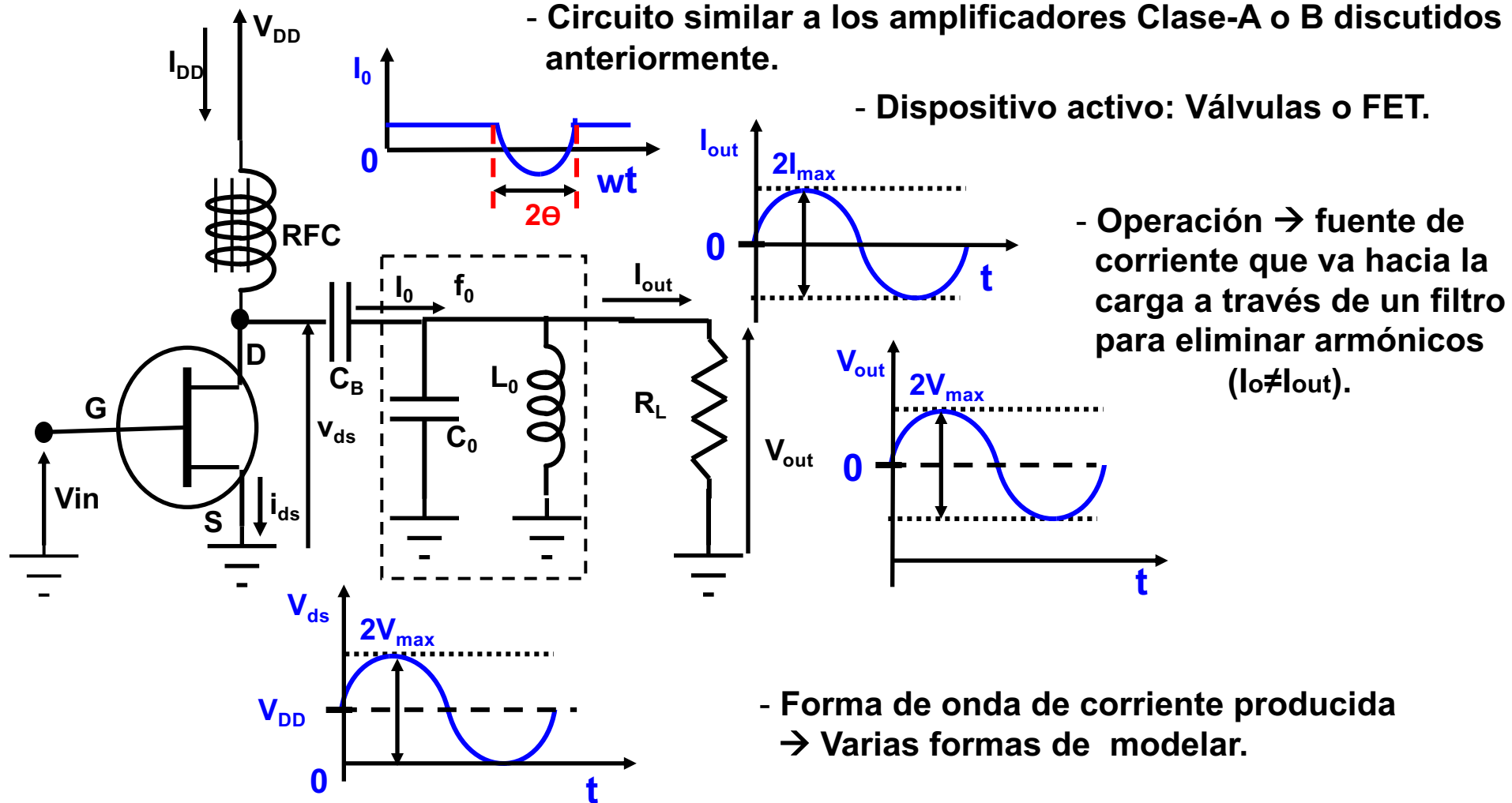
### Ángulo de Conducción $\theta$

Clase	Valor Cte.	Valor min	Valor max
A	$\pi$	—	—
B	$\frac{\pi}{2}$	—	—
AB	—	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$
C	—	0	$\frac{\pi}{2}$



# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (1)



# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (2)

- Modelo más simple: Porción alimentada de una onda seno.
- Corriente  $I_{DQ}$  → Mismo concepto que en Clase-A o B (corriente de reposo) → Negativa en este caso.

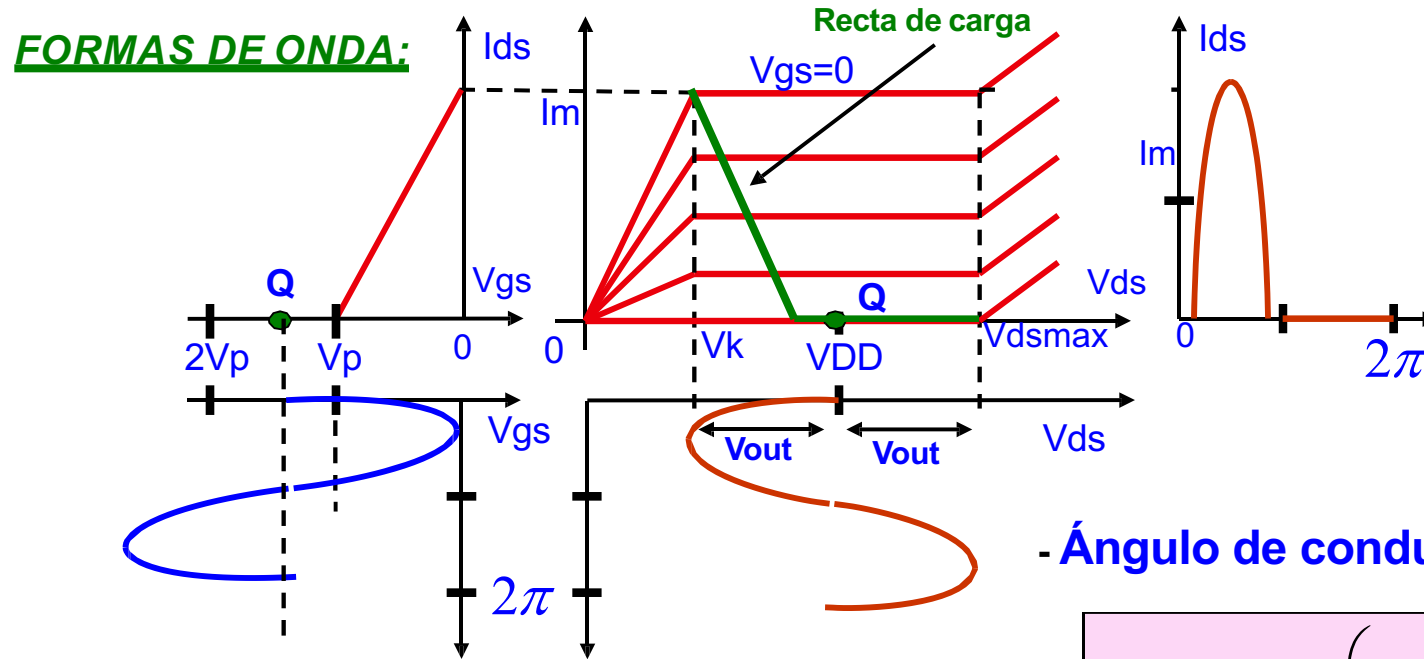
$$i_{ds}(t) = \begin{cases} I_{DQ} - I_{DD} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) & ; I_{DQ} - I_{DD} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \geq 0; & (3\pi/2 - \Theta < \omega t < 3\pi/2 + \Theta) \\ 0 & ; I_{DQ} - I_{DD} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \leq 0; & (0 < \omega t < \frac{3\pi}{2} - \Theta; \frac{3\pi}{2} + \Theta < \omega t < 2\pi) \end{cases}$$

- Se puede considerar que el mayor valor negativo de  $I_{DQ}$  → Porción menor de la onda seno de entrada la cual es amplificada y va a la salida (Siendo  $I_{DD}$  positiva).
- Esta porción de ciclo de RF puede ser especificado en función del **ángulo de conducción  $\Theta$** .
- Relación del **ángulo de conducción** con las corriente de alimentación y de bombeo:

$$i_{ds}(\omega t = \frac{\pi}{2} - \Theta) = 0 \quad \rightarrow \quad I_{DQ} = -I_{DD} \cdot \cos \Theta$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (3)



- **Ángulo de conducción ( $\Theta$ ):**

$$\Theta = \arccos \left( -\frac{I_{DQ}}{I_{DD}} \right)$$

- $I_{DQ} \rightarrow$  Corriente estática en el punto de polarización sin señal aplicada a la entrada.
- $I_{DD} \rightarrow$  Corriente de drenador debida a la excitación (auto polarización, valor máximo).

# Amplificadores de Potencia

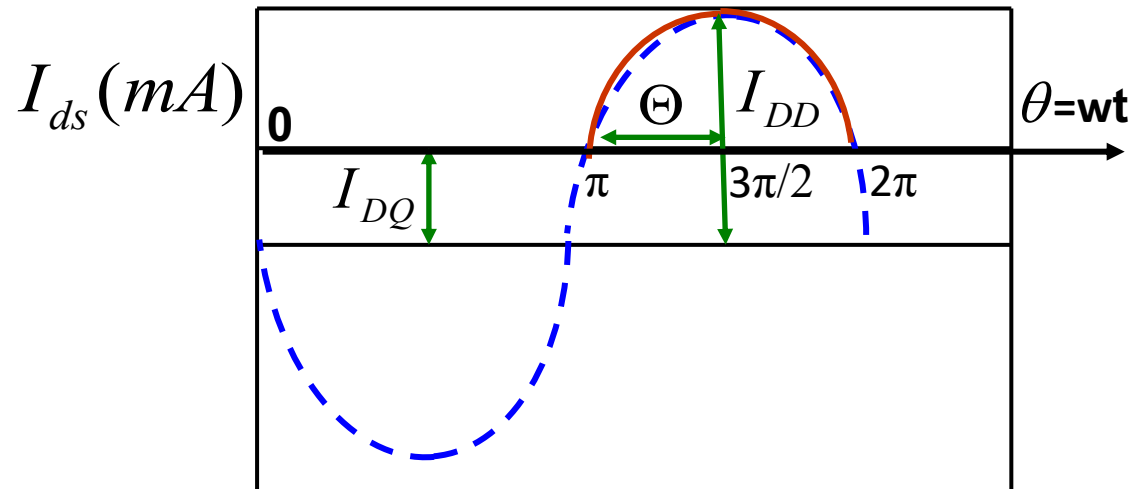
## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (4)

- Clasificación de las clases de operación a partir del **Ángulo de Conducción  $\Theta$**

### Ángulo de Conducción $\Theta$

Clase	Valor Cte	Valor min	Valor max
A	$\pi$	—	—
B	$\pi/2$	—	—
AB	—	$\pi/2$	$\pi$
C	—	0	$\pi/2$

➤ **Forma de onda de la corriente en un amplificador clase C**



$$\Theta = \arccos \left( -\frac{I_{DQ}}{I_{DD}} \right)$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (5)

➤ Corriente de drenador en función del ángulo de conducción:

$$I_{DC} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} i_{ds}(\theta) \cdot d\theta \quad (\theta = \omega \cdot t)$$

- Dispositivo en región activa (ó saturación) durante el periodo especificado por el ángulo de conducción.

$$\frac{3 \cdot \pi}{2} + \Theta < \theta < \frac{3 \cdot \pi}{2} - \Theta \Rightarrow I_{DC} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\frac{3 \cdot \pi}{2} - \Theta}^{\frac{3 \cdot \pi}{2} + \Theta} i_{ds}(\theta) \cdot d\theta$$

$$I_{DC} = \frac{1}{\pi} \cdot (I_{DQ} \cdot \Theta + I_{DD} \cdot \text{sen}\Theta)$$

- Sustituyendo  $I_{DQ}$  por su valor →  $I_{DQ} = -I_{DD} \cdot \text{cos}\Theta$

$$I_{DC} = \frac{I_{DD}}{\pi} \cdot (\text{sen}\Theta - \Theta \cdot \text{cos}\Theta)$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (6)

### ➤ Tensión de salida en función del ángulo de conducción:

- Capacidad  $C_B$  aísla la corriente de salida ( $i_{out}$ ) de la de alimentación DC que pasa a través de RFC.
- Corriente de salida ( $i_{out}$ ) se disipa en la carga a través del circuito de sintonía.
- El circuito de sintonía se supone ideal → Impedancia infinita a la frecuencia de resonancia y muy baja al resto de frecuencias. → Elimina los armónicos de salida → Tensión de salida sinusoidal.

$$v_{out} = V_{max} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

- Señal de salida  $V_{max}$  generada a través de la carga:

$$V_{max} = \frac{-1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i_{ds}(\theta) \cdot R_L \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \quad \theta = \omega \cdot t$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (7)

➤ Tensión de salida en función del ángulo de conducción:

- Tensión de salida generada cuando el dispositivo actúa en la región activa:

$$V_{\max} = \frac{-1}{\pi} \cdot \int_{\frac{3\cdot\pi}{2}-\Theta}^{\frac{3\cdot\pi}{2}+\Theta} i_{ds}(\theta) \cdot R_L \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta$$

- Teniendo en cuenta  $\rightarrow i_{ds}(\theta) = I_{DQ} - I_{DD} \cdot \text{sen}\theta$

- Señal de salida  $V_{\max}$  generada a través de la carga:

$$V_{\max} = \frac{R_L}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ 4 \cdot I_{DQ} \cdot \text{sen}\Theta + 2 \cdot I_{DD} \cdot \Theta + I_{DD} \cdot \text{sen}\Theta \right]$$

- Sustituyendo  $I_{DQ}$  por su valor  $\rightarrow I_{DQ} = -I_{DD} \cdot \text{cos}\Theta$

$$V_{\max} = \frac{I_{DD} \cdot R_L}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ 2 \cdot \Theta - \text{sen}(2 \cdot \Theta) \right]$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (8)

- **Potencia de continua:** A partir de la alimentación  $V_{DD}$  y de la corriente DC debida a la excitación.

$$P_{DC} = V_{DD} \cdot I_{DC} = \frac{V_{DD} \cdot I_{DD}}{\pi} \cdot (\text{sen}\Theta - \Theta \cdot \cos\Theta)$$

- **Potencia de salida:** La más alta eficiencia en un Clase-C se consigue cuando la excursión de la tensión de drain es igual a la tensión de alimentación,  $V_{DD}$

$$P_{out} = \frac{V_{\max}^2}{2 \cdot R_L}$$

- Tensión máxima de salida no puede exceder el valor de alimentación:

$$V_{out\max} = V_{DD} \Rightarrow P_{out,\max} = \frac{V_{\max}^2}{2 \cdot R_L} = \frac{V_{DD}^2}{2 \cdot R_L}$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (9)

### ➤ Eficiencia en Clase-C:

- Sabemos:  $V_{out,max} = V_{DD}$

### ➤ Máxima eficiencia de un amplificador clase C:

$$\eta_{max} = \frac{P_{out,max}}{P_{DC}} = \frac{2 \cdot \Theta - \text{sen}(2 \cdot \Theta)}{4 \cdot [\text{sen}(\Theta) - \Theta \cdot \cos(\Theta)]}$$

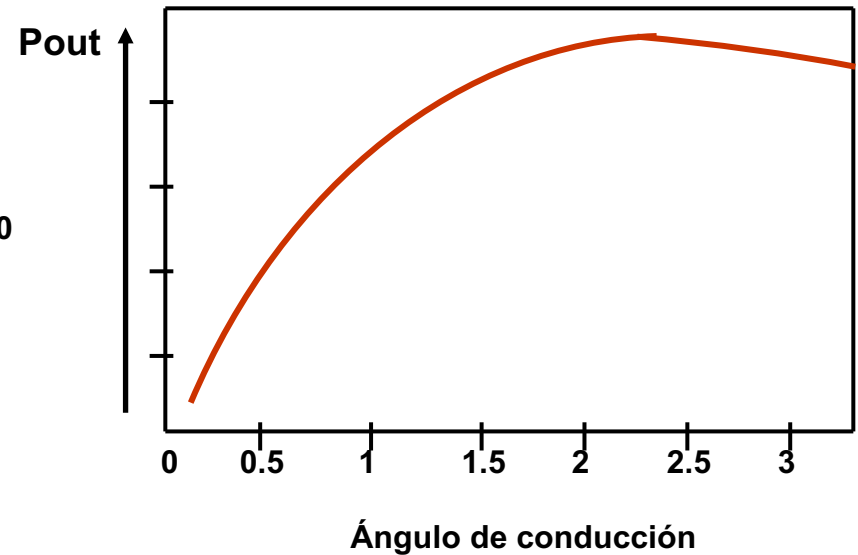
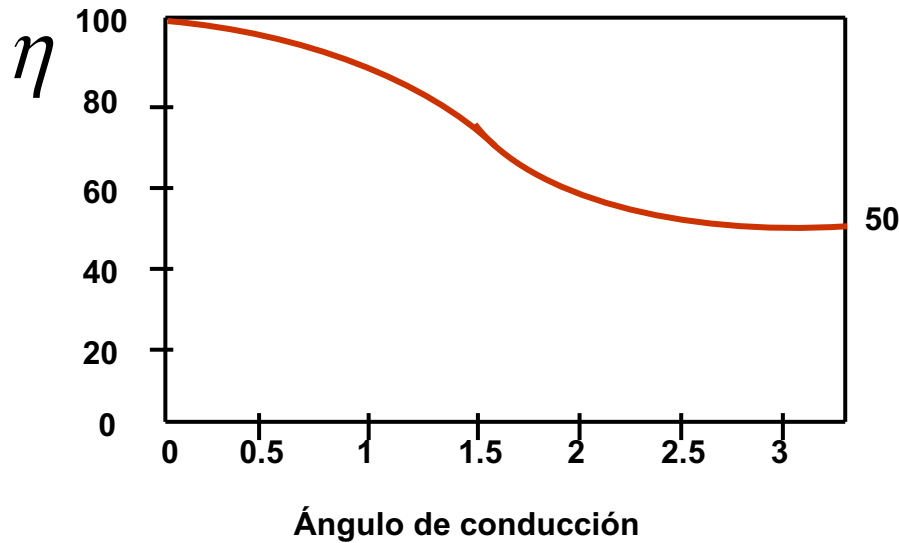
### ➤ Potencia normalizada de un amplificador clase C: Se calcula a partir del máximo voltaje de drenador $V_{dsmax} = 2V_{DD}$ y de la máxima corriente de drain $I_{dsmax} = I_{DQ} + I_{DD}$

$$P_{normalizada} = \frac{P_{out,max}}{V_{ds,max} \cdot I_{ds,max}} = \frac{2 \cdot \Theta - \text{sen}(2 \cdot \Theta)}{8 \cdot \pi \cdot [1 - \cos(\Theta)]}$$

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase-C (Clásico) (10)

➤ Eficiencia y Potencia de salida de un Clase-C en función del Ángulo de Conducción:

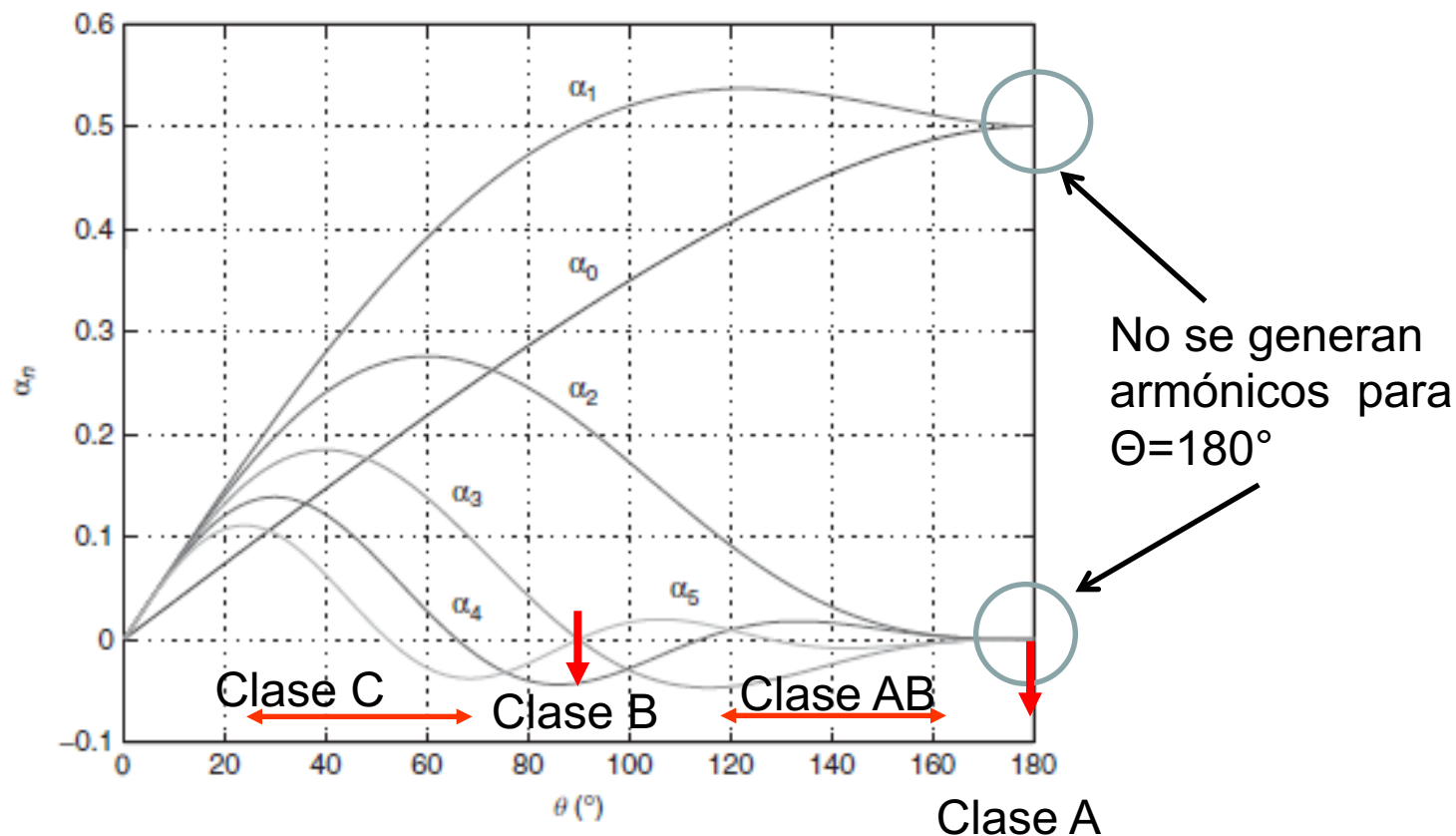


-Teóricamente se podría llegar a valores de eficiencia del 100% → No es una solución práctica porque la potencia de salida sería nula.

# Amplificadores de Potencia

## Amplificadores de potencia Clase AB, B, C

- Componentes armónicas de la corriente  $i_{ds}$  (0: DC, 1:fundamental, 2: 2º armónico, etc.) en función del Ángulo de Conducción  $\Theta$ :



**Figure 3.7** Fourier coefficients  $\alpha_n$  of the drain current  $i_D$  as a function of the conduction angle  $\theta$  for the Class AB, B, and C RF power amplifiers.

# Amplificadores de Potencia Material Adicional

- Video tutorial sobre diseño de amplificadores de potencia en clases A, B, AB:
  - <https://youtu.be/GhPqPVIDRPY?si=nHINyJwHdKnS3v0m>
- Video tutorial sobre diseño de amplificadores de potencia en clase F:
  - [https://youtu.be/Ps8W6vMbItM?si=kISMkCsPIMNVuK\\_-](https://youtu.be/Ps8W6vMbItM?si=kISMkCsPIMNVuK_-)
- Video tutorial sobre simulaciones Load Pull:
  - <https://youtu.be/34N-r5rPSzU?si=linNITogUcmYIY6B>
- Video tutorial diseño de GaN PAs:
  - <https://youtu.be/10YICortvn8?si=PjZGNvstievaASdy>