Sistemas de Radiofrecuencia

Tema 3. Amplificadores de potencia

Almudena Suárez Rodríguez
Franco Ramírez Terán
Mabel Pontón Lobete

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Este tema se publica bajo Licencia:
Creative Commons BY-NC-SA 4.0

Contenidos

- Introducción:
  - Aplicaciones.
  - Desarrollo.
- Características:
  - Potencia de salida.
  - Eficiencia.
  - Linealidad.
- Clases de amplificación.
- Arquitecturas.

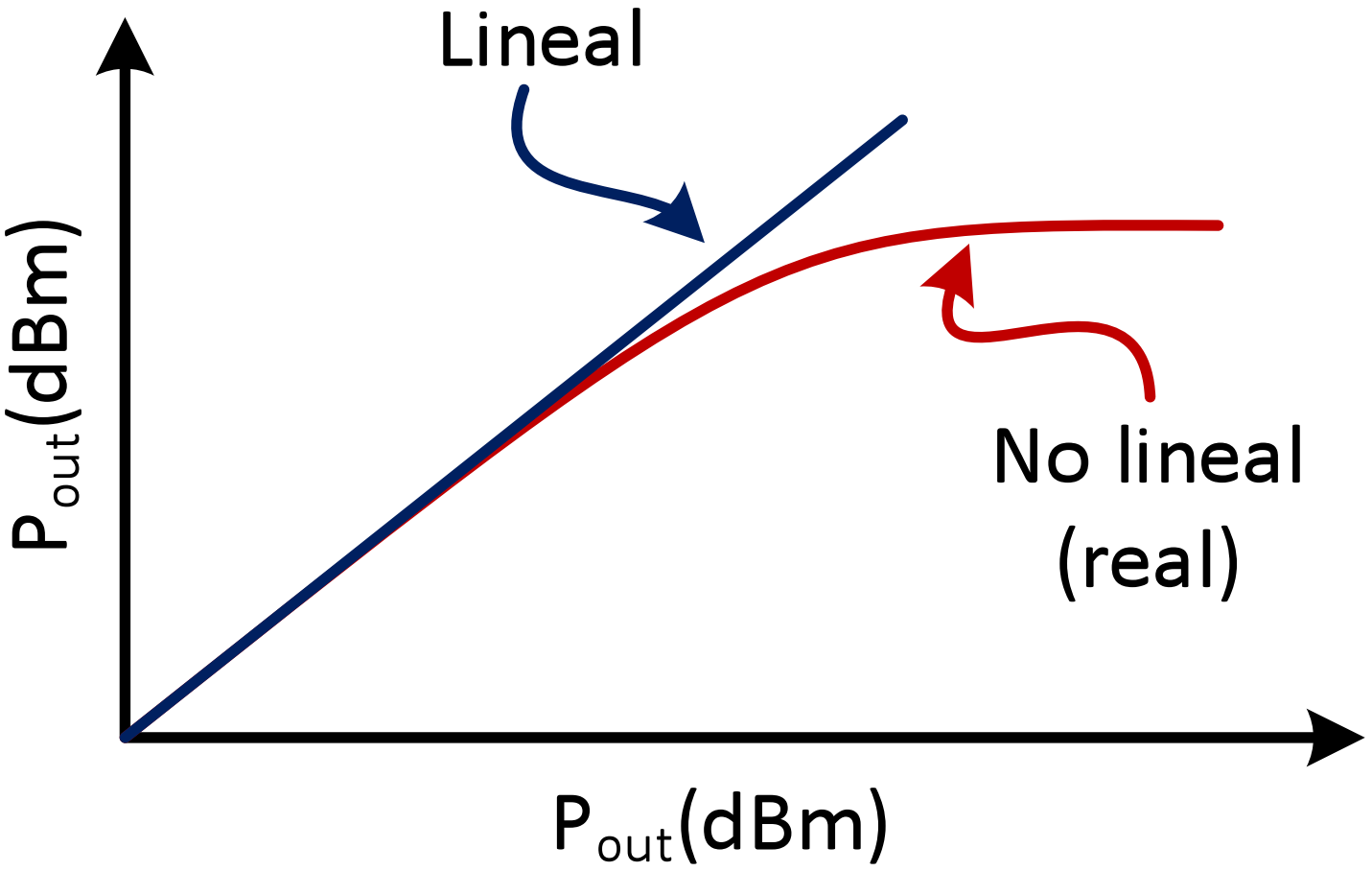
Introducción

- Conversión de potencia de dc a RF o microondas.
- Aplicaciones.
- Características principales.

Características

- Linealidad.
- Potencia de salida.
- Ganancia.
- Eficiencia:
  - Ganancia de drenador.
  - PAE.
  - Eficiencia total.

Amplificador de potencia



Linealidad

- La linealidad de un amplificador es esencial cuando la señal a amplificar tiene tanto modulación de amplitud como de fase.
- La no linealidad distorsiona la señal amplificada:
  - Canal adyacente.
  - Errores de detección.

No linealidad del amplificador

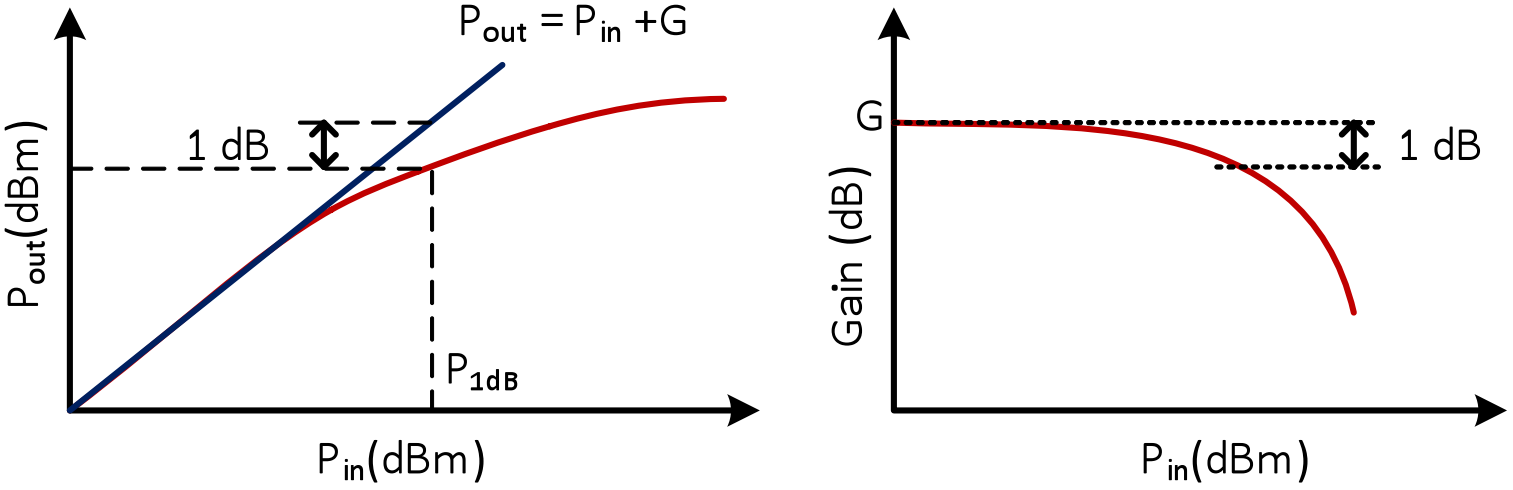
- Las no linealidades causan una reproducción imperfecta de la señal amplificada:
  - Distorsión.
  - Recrecimiento espectral.
- Causas:
  - Ganancia variable.
  - Saturación del amplificador (transistor).
  - AM-PM.
  - Efector térmicos.

Medida de la linealidad

- Se puede utilizar varias métricas para caracterizar / especificar la linealidad. En amplificadores de potencia:
  - P1dB.
  - C/I – “Carrier to intermodulation”.
  - Punto de intercepción de tercer orden IP3.
  - ACPR.

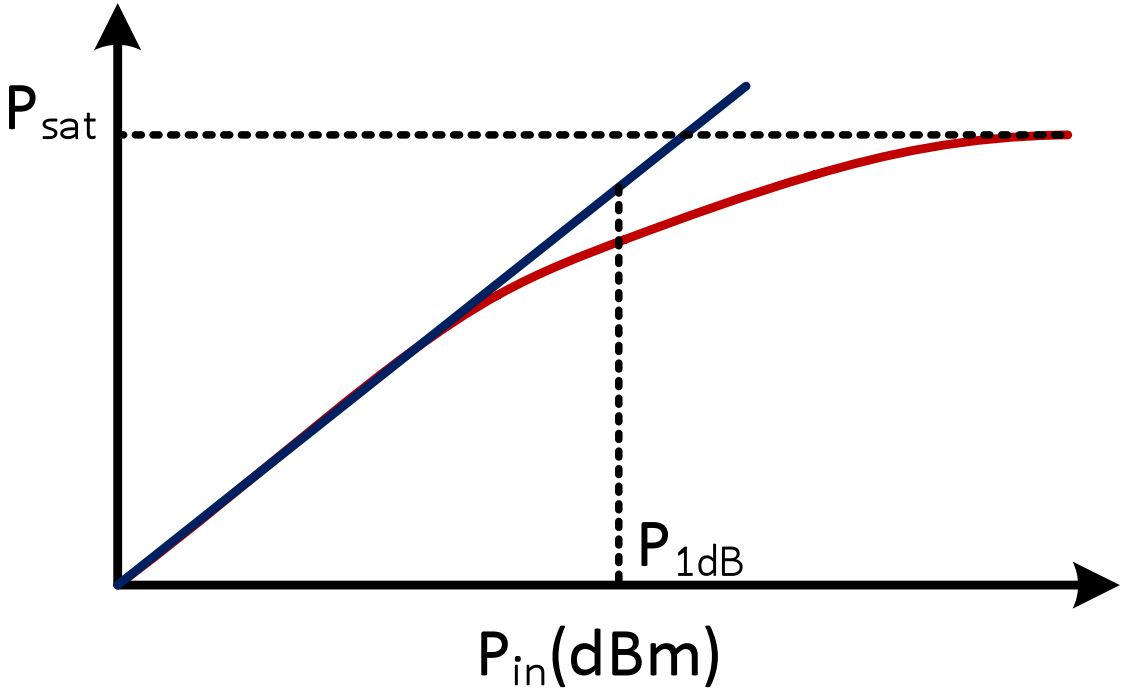
Punto de compresión de 1dB

- Medida de la linealidad de un dispositivo.
- El punto en el que la salida deja de seguir linealmente a la entrada y se desvía en 1 dB, se denomina punto de compresión de 1 dB.



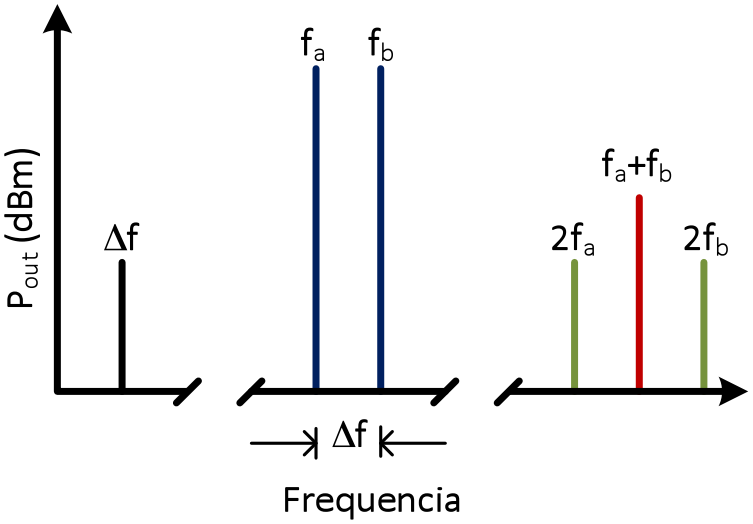
Potencia vs Potencia Saturada

- La potencia saturada de salida es el valor donde la pendiente de la curva $P_{in} - P_{out}$ se hace cero. Lo máximo que se puede obtener (en algunos casos se especifica el punto a –3 dB).

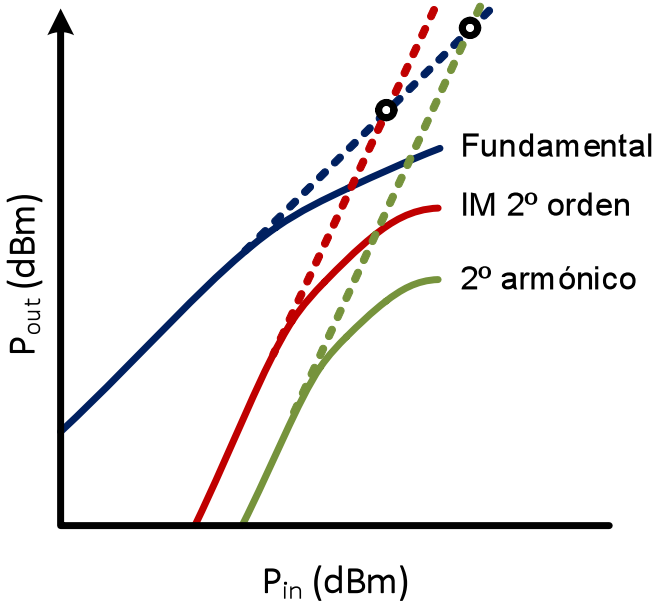


IP2 – Punto de intercepción de segundo orden

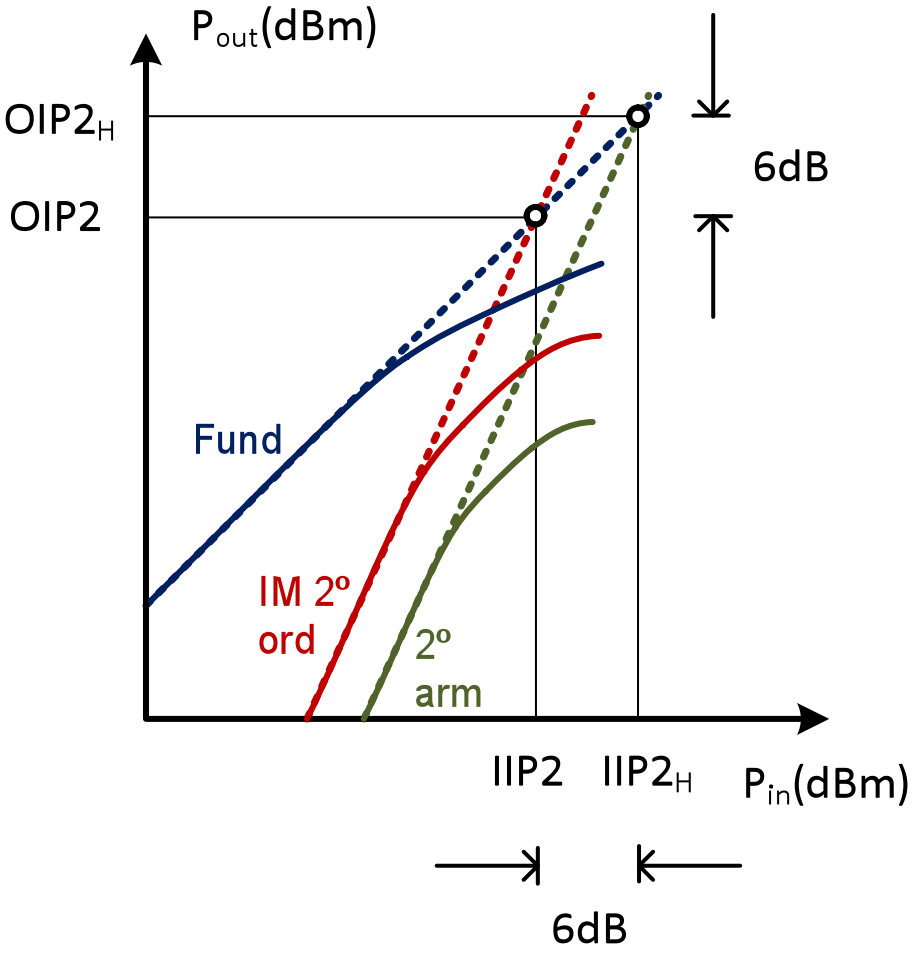
- Punto de intercepción teórico (no físico) en la curva Pout – Pin donde la señal de salida y los productos de segundo orden tienen la misma amplitud.



Señales de igual amplitud.



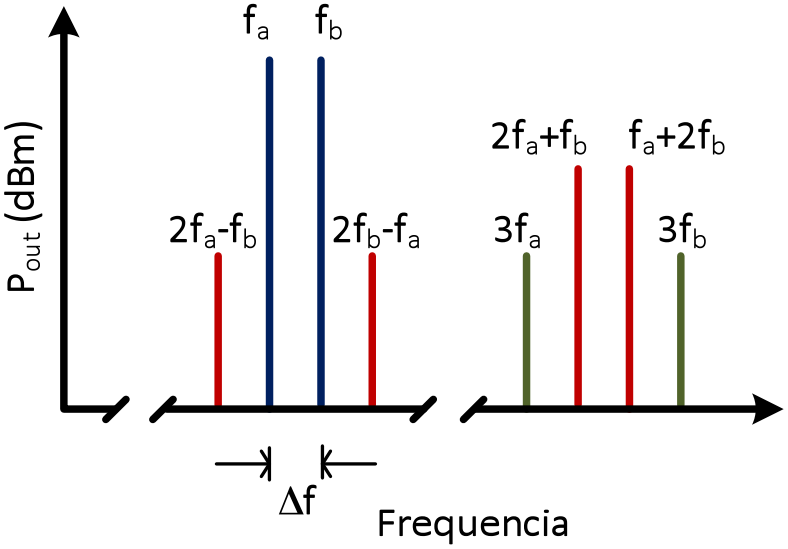
IP2 – Punto de intercepción de segundo orden



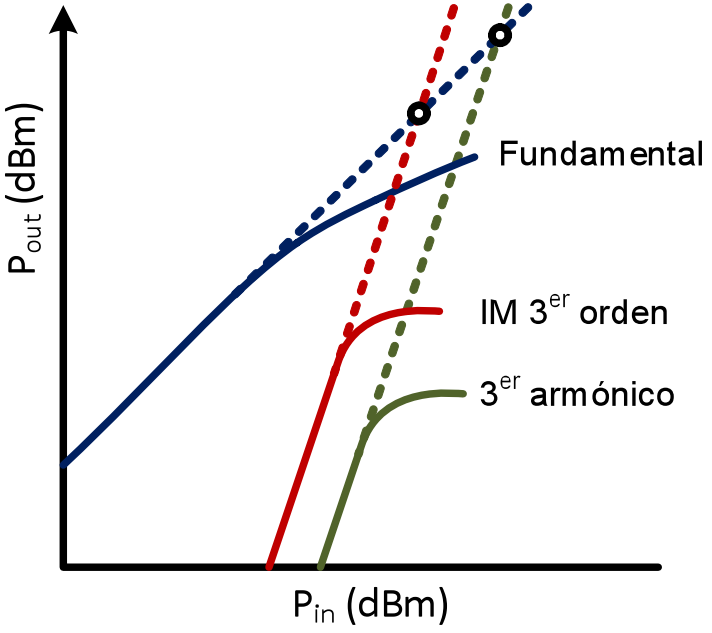
$$OIP = IIP + G$$

IP3 – Punto de intercepción de tercer orden

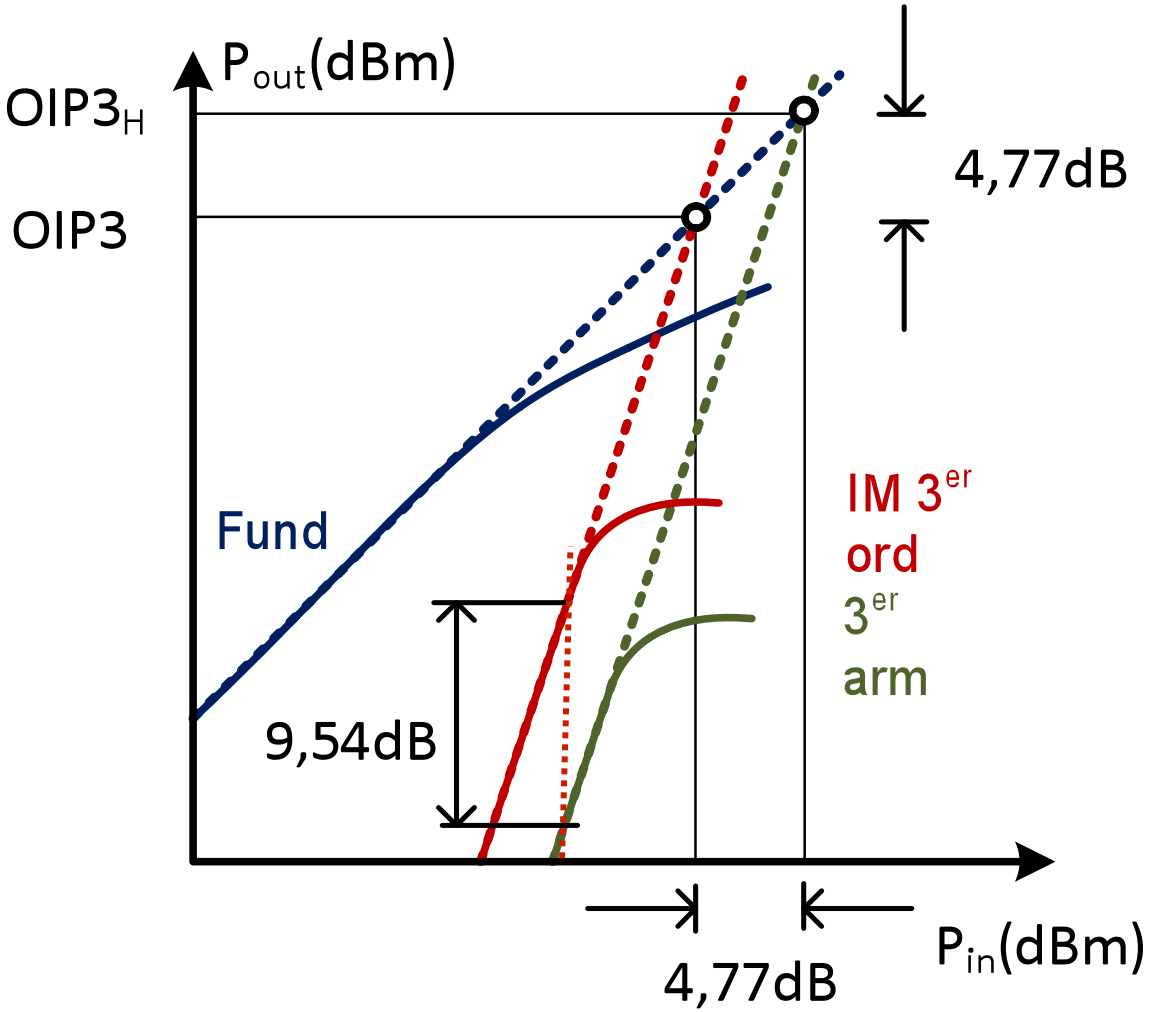
- Punto teórico en la curva Pin- Pout donde la señal de entrada/salida se iguala en magnitud a los productos de tercer orden:
  - Puede referirse a la entrada IIP3 o a la salida OIP3.



Señales de igual amplitud.



IP3 – Punto de intercepción de tercer orden

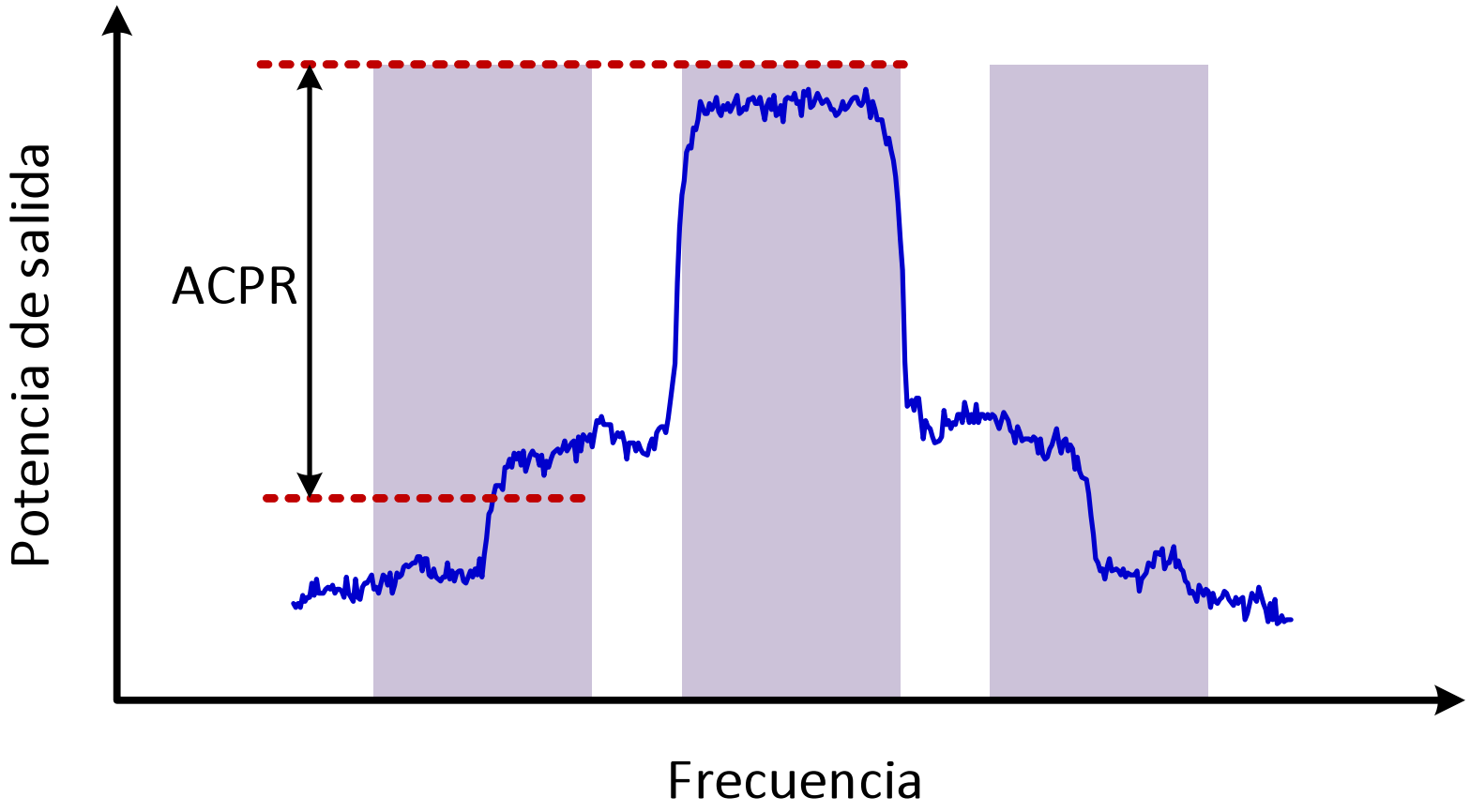


Relación de potencia de canal adyacente (ACPR)

Adjacent Channel Power Ratio (ACPR):

- Medida de la distorsión cuando se reemplazan los dos tonos por una señal modulada.
- Es una medida común que indica cuanta potencia emite el transmisor fuera de su banda asignada:
  - Recrecimiento espectral.
  - Interferencia a los canales adyacentes.
- Es la relación de la potencia en un ancho de banda dado, fuera del canal, sobre la potencia en el canal de interés.

Relación de potencia de canal adyacente (ACPR)



Relación de la potencia en un canal 'adyacente' especificado y la potencia de la señal de interés.

Eficiencia

- La eficiencia, al igual que la linealidad, es un paráme-tro importante en los amplificadores de potencia.
- Se puede definir de distintas maneras. Las más típicas:
  - Eficiencia de drenador.
  - Eficiencia Añadida.
  - Eficiencia Total.

Eficiencia

Eficiencia de drenador:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}}$$

Eficiencia de potencia añadida:

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{dc}} = \eta_D \left(1 - \frac{1}{G}\right)$$

Eficiencia total (Overall efficiency):

$$\eta_{total} = \frac{P_{out}}{P_{dc} + P_{RF,in}}$$

Para algunos amplificadores, la eficiencia es máxima para su potencia más alta instantánea y se reduce con la potencia.

AM – Modulaciones de amplitud –> Eficiencia variable en el tiempo.
Se define eficiencia promedio – Potencia promedio/Pdc promedio.

Clases de amplificación

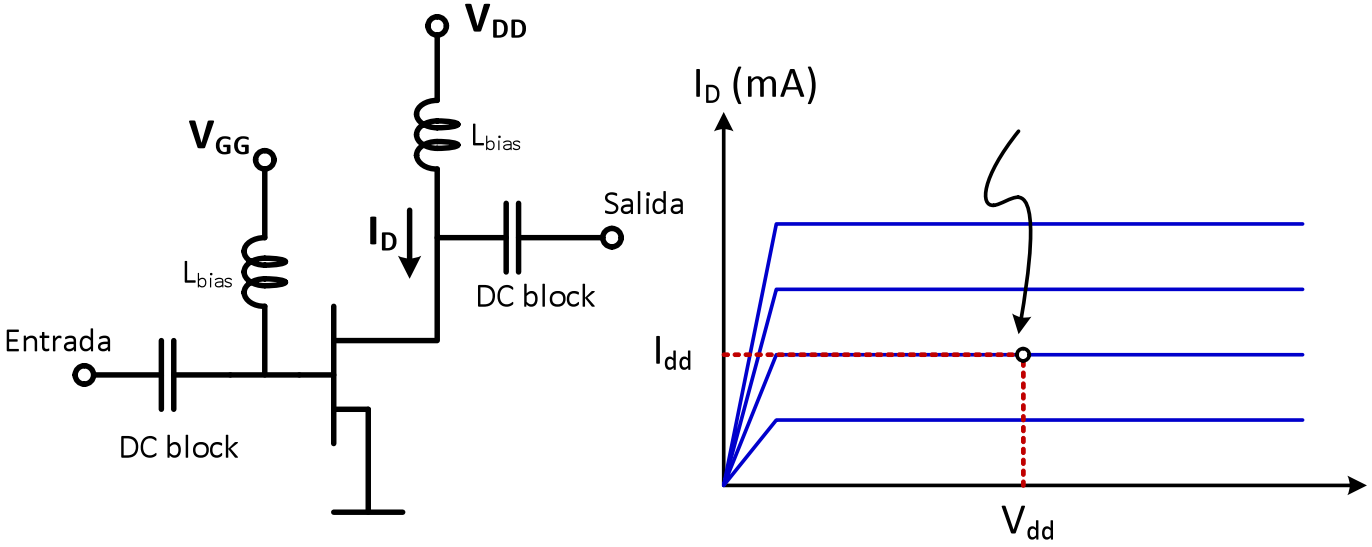
- Las clases de amplificación se clasifican en función del ángulo de conducción (ratio ciclo de entrada – conducción de corriente).
- Las distintas clases de amplificación también tienen distintos valores de power output capability (transistor utilization factor): Potencia de salida dividida por el producto del máximo voltaje y corriente el transistor.

Clases de amplificación

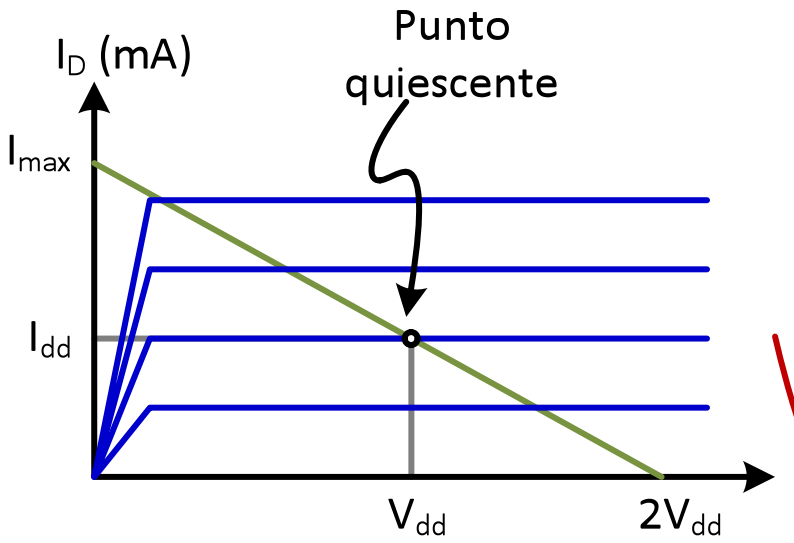
- Amplificadores de potencia convencionales:
  - Clase A.
  - Clase B.
  - Clase C.
- Amplificadores conmutados:
  - Clase D.
  - Clase E.
  - Clase F.

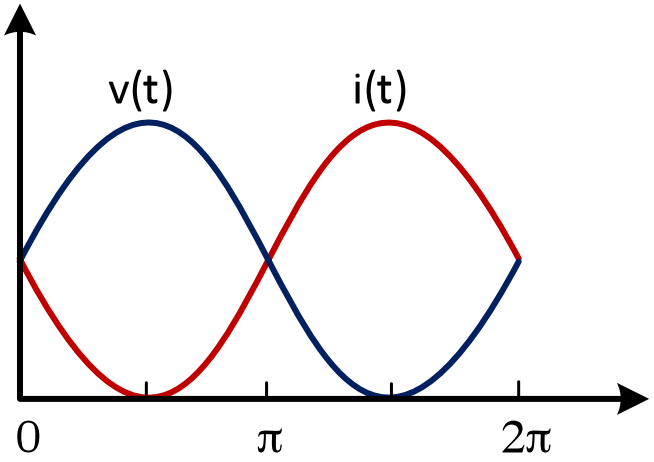
Clase A

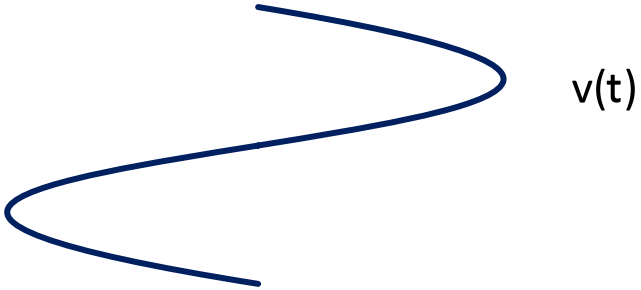
- La clase de amplificación más popular: la más lineal.
- La corriente quiescente es grande y el transistor permanece siempre en la región activa.
- La forma de onda del voltaje de salida y la corriente es sinusoidal (idealmente).



Clase A



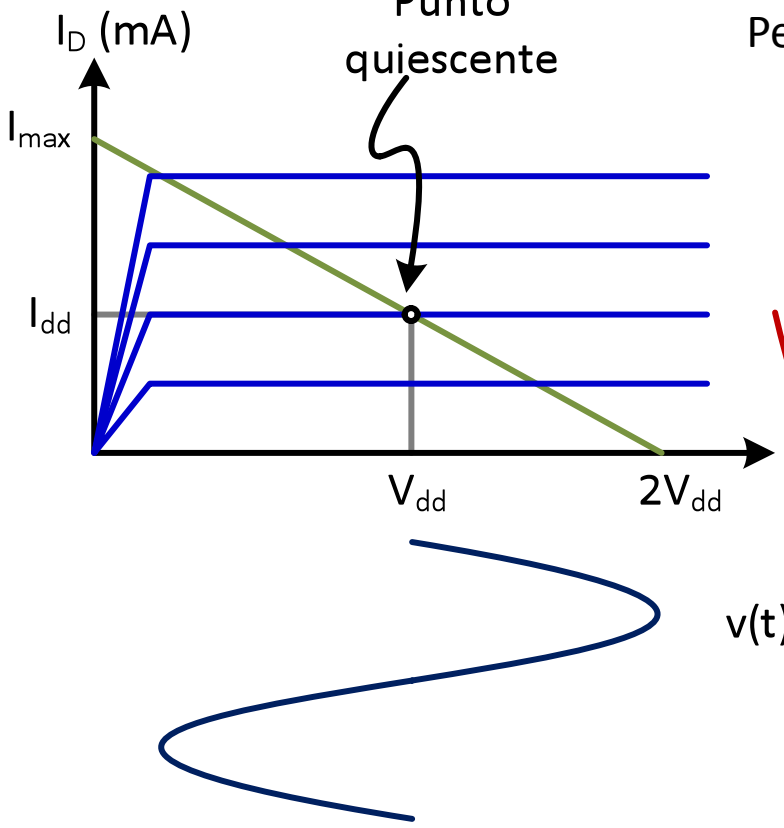




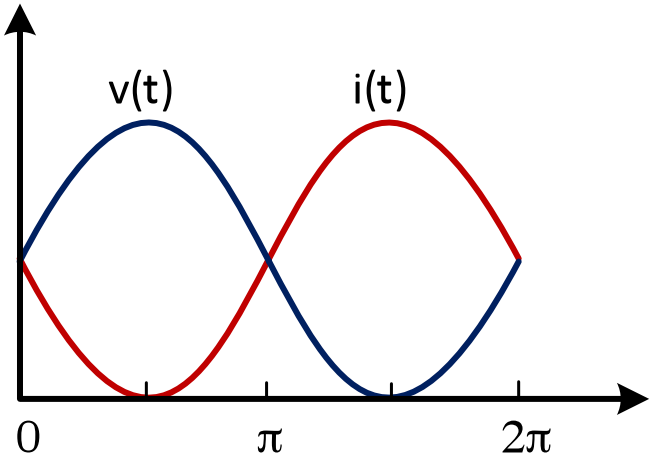
El ángulo de conducción es 360°.

Siempre se disipa energía dado que el producto de la corriente y voltaje de drenador/colector es siempre positivo.

Clase A



Recta que pasa por dos puntos: (V_{dd}, I_{dd}) y ($2V_{dd}$, 0)
Pendiente: $-R_L$.



El ángulo de conducción es 360°.

Siempre se disipa energía dado que el producto de la corriente y voltaje de drenador/colector es siempre positivo.

Clase A

$$I_{dd} = \frac{V_{dd}}{R_L} \qquad \eta_{\max} = \frac{P_{L,max}}{P_{dc}} = \frac{1}{2} = 50\%$$

$$P_{dc} = I_{dd} V_{dc} = \frac{V_{dd}^2}{R_L}; \qquad P_{L,max} = \frac{V_{dd}^2}{2R_L}$$

Teniendo en cuenta:

- V_{ds} no alcanza valores nulos.
- Variaciones en las condiciones de polarización.
- Perdidas en filtros e interconexiones.

El valor de eficiencia final es menor al 50% ideal.

Clase A

Máxima Potencia de Salida Normalizada

Normalized power output capability.

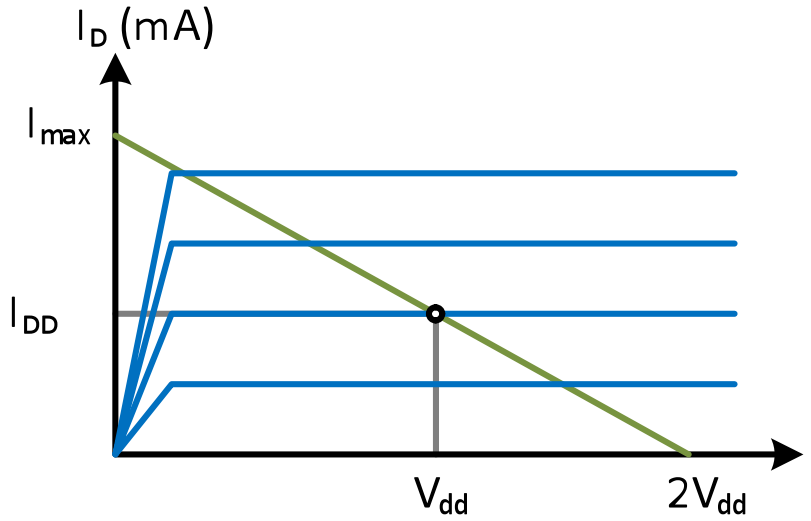
$$P_{N,max} = \frac{P_{L,max}}{P_{max}}$$

Figura de mérito adimensional.

$$P_{L,max} = \frac{V_{dd}^2}{2R_L}$$

$$P_{\max} = (2V_{dd})2I_{dd} = \frac{4V_{dd}^2}{R_L}$$

$$P_{N,max} = \frac{P_{L,max}}{P_{max}} = \frac{1}{8}$$

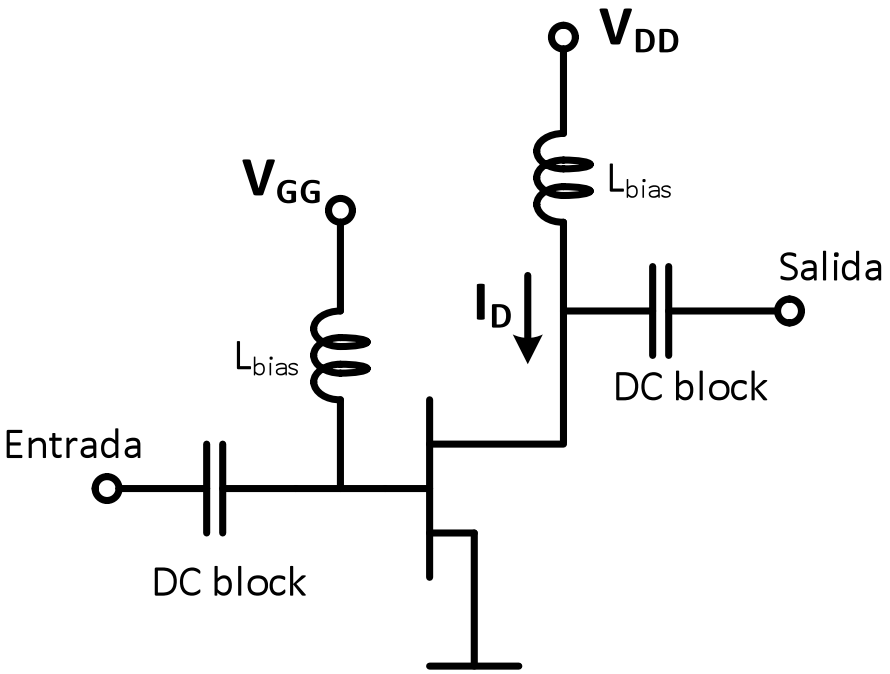


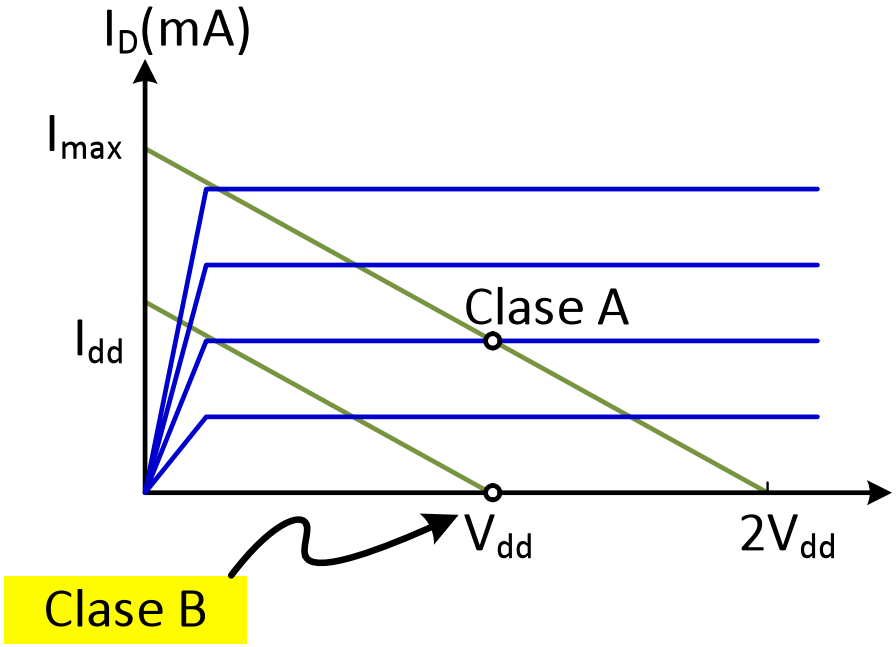
La clase A proporciona linealidad a costa de una baja eficiencia y de la 'fatiga' del dispositivo.

Clase B

- Reduce el tiempo en el que la corriente y el voltaje de drenador son no nulos para mejorar la eficiencia:
  - Minimiza disipación en el transistor.
- El transistor está polarizado de manera que sólo conduzca durante la mitad del ciclo (50% del tiempo).
- La corriente quiescente es nula.
- El comportamiento es lineal con respecto a la amplitud de entrada (proporcional).
- Genera frecuencias fuera de banda. Requiere filtrado a la salida.

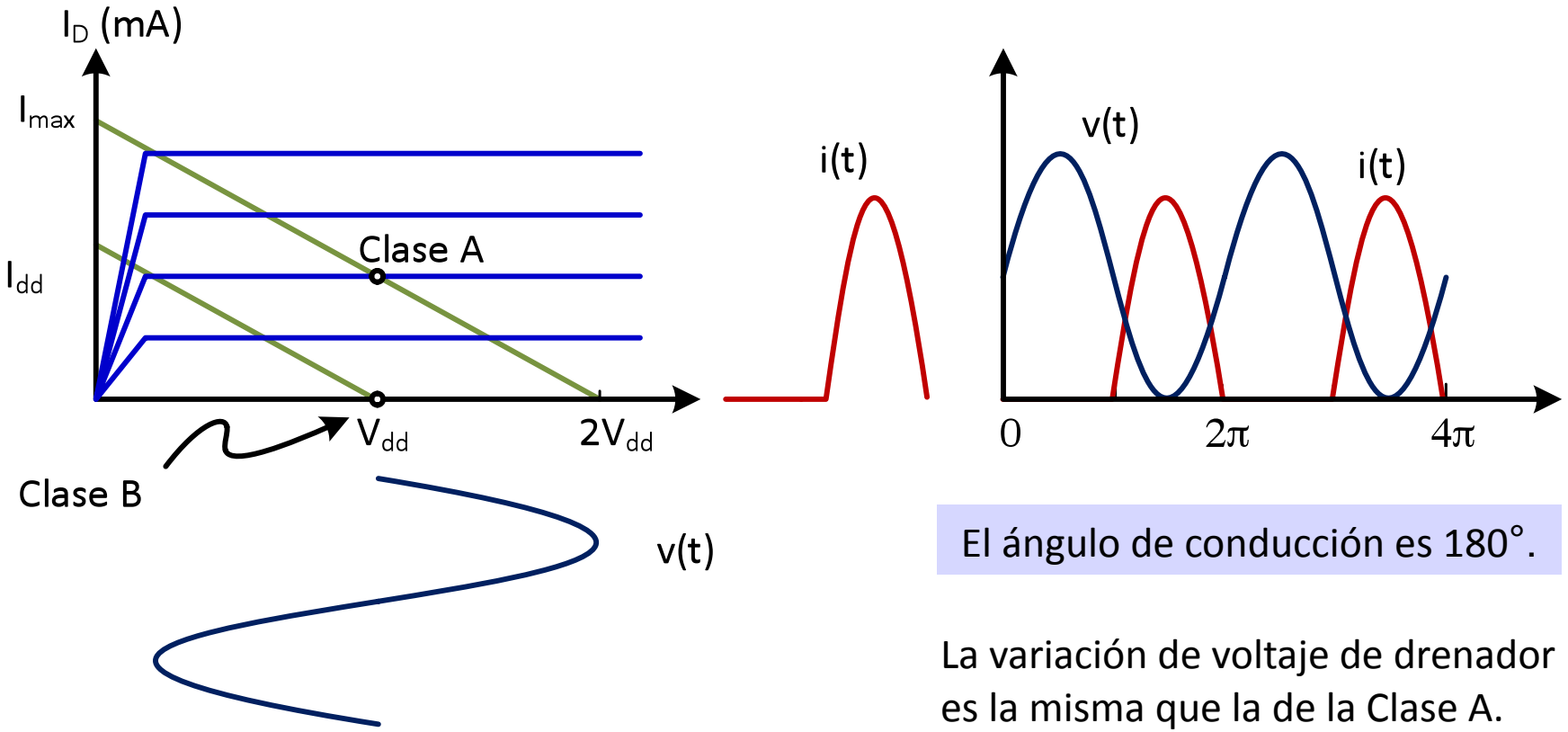
Clase B





Corriente quiescente nula en ausencia de señal a la entrada.

Clase B

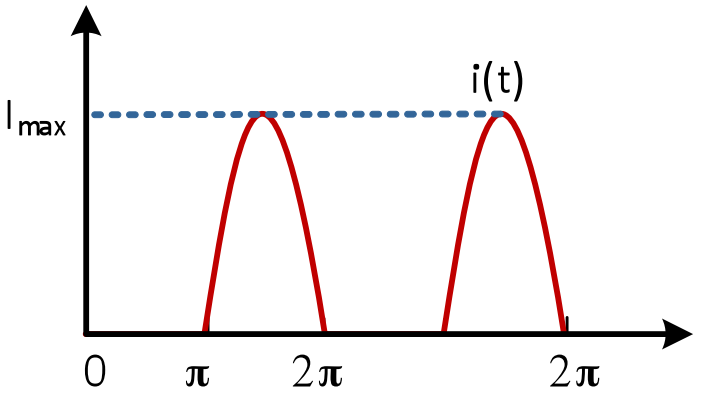


El ángulo de conducción es 180°.

La variación de voltaje de drenador es la misma que la de la Clase A.

Clase B - Eficiencia

$$i(t) = \begin{cases} 0 & ;0 < \omega t < \pi \\ I_{max}\sin(\omega t) & ;\pi < \omega t < 2\pi \end{cases}$$



Dado que la corriente ya no es una función sinusoidal completa debemos calcular la componente de dc y los armónicos mediante su expresión en serie de Fourier.

$$i_D(t) = a_0 + a_1\cos(\omega t) + a_2\cos(2\omega t) + a_3\cos(3\omega t) + \cdots$$

Calculando los términos de la serie de Fourier, tenemos:

$$a_0 = \frac{I_{max}}{\pi}; \quad a_1 = \frac{I_{max}}{2}$$

$$a_2 = \frac{2I_{max}}{3\pi}; \quad a_3 = 0$$

Sólo se generan armónicos pares.

Clase B - Eficiencia

$$I_{dc} = \frac{I_{\max}}{\pi}$$

$$P_{dc} = I_{dc} V_{dd} = \frac{2V_{dd}^2}{\pi R_L}$$

Se elige R_L de manera que:

$$R_L = \frac{2V_{dd}}{I_{max}}$$

$$P_{L,\max} = \frac{V_{dd}^2}{2R_L}$$

Amplitud voltaje: V_{DD}

$$I_{max} = \frac{2V_{dd}}{R_L}$$

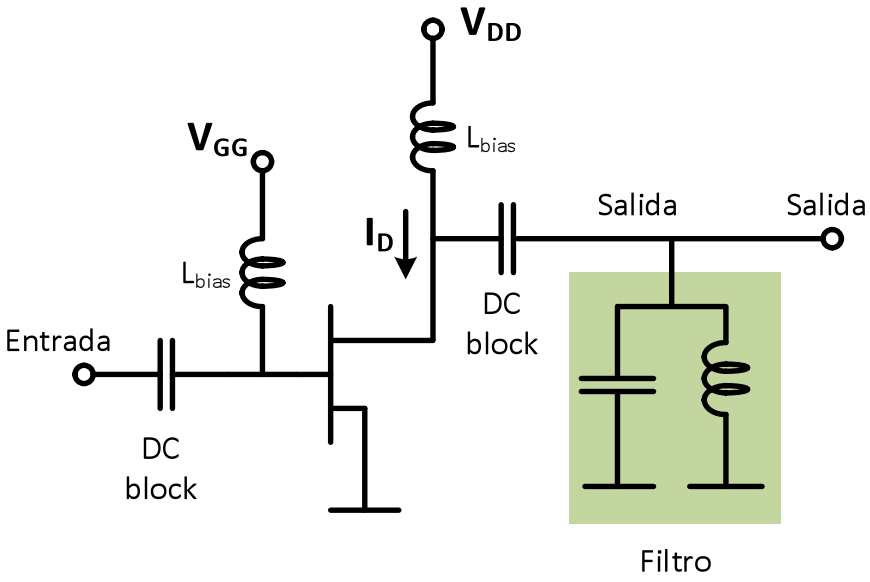
$$\eta_{\max} = \frac{P_{L,max}}{P_{dc}} = \frac{\pi}{4} \approx 79\%$$

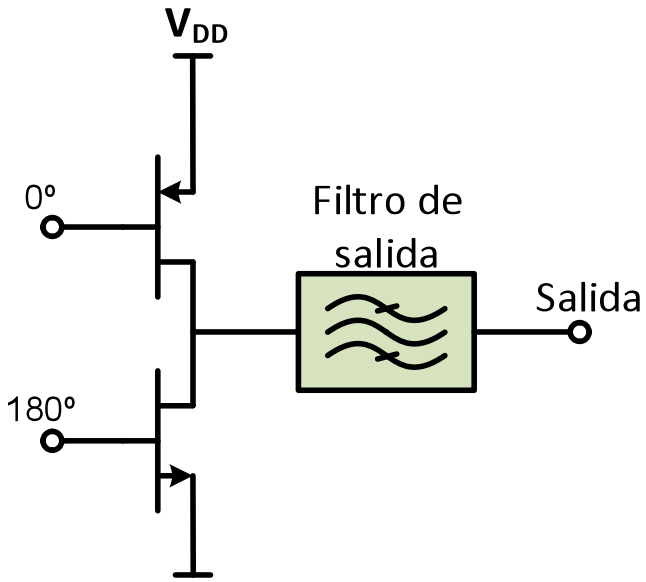
Máxima Potencia de Salida Normalizada:

$$P_{N,max} = \frac{P_{L,max}}{P_{max}} = \frac{1}{8}$$

Mismo valor que en la clase A.

Clase B

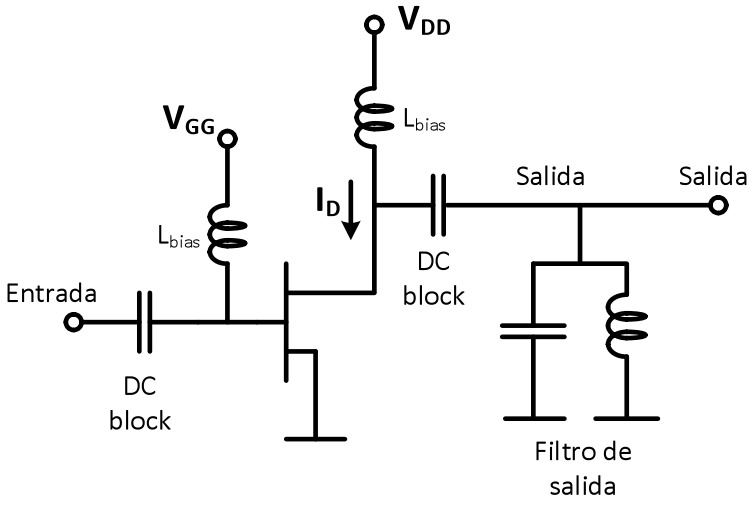




- Los armónicos a la salida se filtran con el tanque y sólo la componente fundamental se entrega a la carga.
- Al igual que en la clase A, la eficiencia máxima depende de la implementación práctica.
- A bajas frecuencias se suelen utilizar topologías complementarias. PNP-NPN (sinusoide completa).

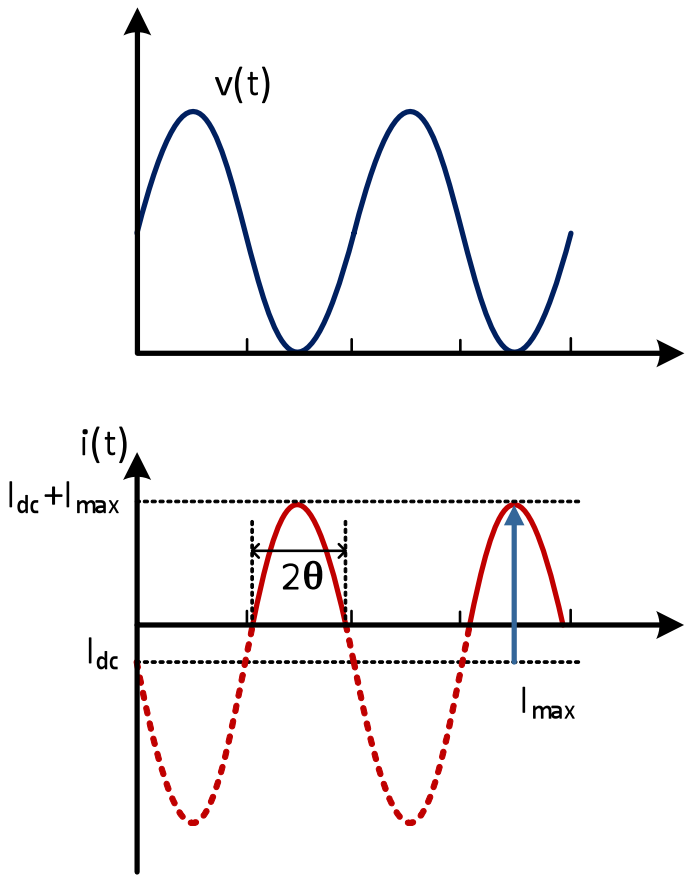
Clase C

- El transistor conduce menos de la mitad del ciclo, produciendo un tren de pulsos: $V_{bias} < V_T$. Corriente quiescente nula.
- La amplitud de salida deja de ser una función lineal respecto a la entrada:
  - No apto para modulaciones en amplitud.
- Ángulo de conducción menor a p.



El filtro de salida cortocircuita los armónicos.

Clase C



$$i_D(t) = I_{dc} + I_{max}\cos\omega t$$

I_{dc} es negativa, no cero:

$$\phi_1 = \cos^{-1}(-I_{dc}/I_{max})$$

$$\phi_2 = -\cos^{-1}(-I_{dc}/I_{max})$$

Las dos soluciones del coseno.

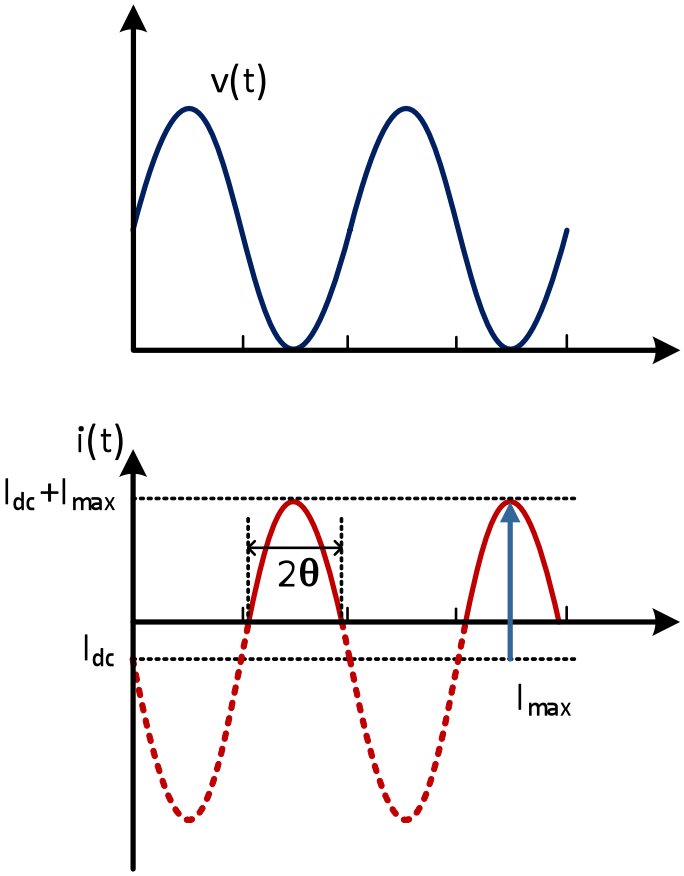
El ángulo de conducción:

$$2\phi = 2\cos^{-1}\left(-\frac{I_{dc}}{I_{max}}\right)$$

Resolviendo para la corriente de dc:

Prefijado el ángulo de conducción. $$I_{dc} = -I_{max}\cos\phi$$

Clase C



Calculando el valor promedio de la corriente:

Quiescente

$$\bar{i}_D = \frac{1}{T}\int_{-\phi}^{\phi}\left(I_{dc} + I_{max}cos\phi\right)d\phi$$

$$= \frac{1}{2\pi}2\phi I_{dc} + \frac{I_{max}}{2\pi}\sin\phi\Big|_{-\phi}^{\phi}$$

Real → $$\bar{i}_D = \frac{I_{max}}{\pi}\left(\sin\phi - \phi\cos\phi\right)$$

La componente fundamental de la serie de Fourier de la corriente es*:

$$I_1 = \frac{2}{T}\int_0^T i_D(t)\cos(\omega t)dt$$

$$= \frac{I_{max}}{2\pi}\left(2\phi - \sin 2\phi\right)$$

* [Thomas Lee].

Clase C

Derivando la ecuación para excursión máxima de voltaje:

$$V_{dd} = I_{max}\frac{R}{2\pi}(2\phi - \sin 2\phi) \qquad \overline{i_D} = \frac{I_{max}}{\pi}(\sin\phi - \phi\cos\phi)$$

$$I_{max} = \frac{2\pi V_{dd}}{R(2\phi - \sin 2\phi)} \qquad I_1 = \frac{I_{max}}{2\pi}(2\phi - \sin 2\phi)$$

El pico de corriente de drenador es la suma de i_1 y el término de continua:

$$i_{D,pk} = I_{dc} + I_1$$

$$= \frac{2\pi V_{dd}}{R(2\phi - \sin 2\phi)}\left[1 + \frac{\sin\phi - \phi cos\phi}{\pi}\right]$$

Para un voltaje de entrada constante, la corriente tiende a infinito si $\emptyset \rightarrow 0$.

Clase C - Eficiencia

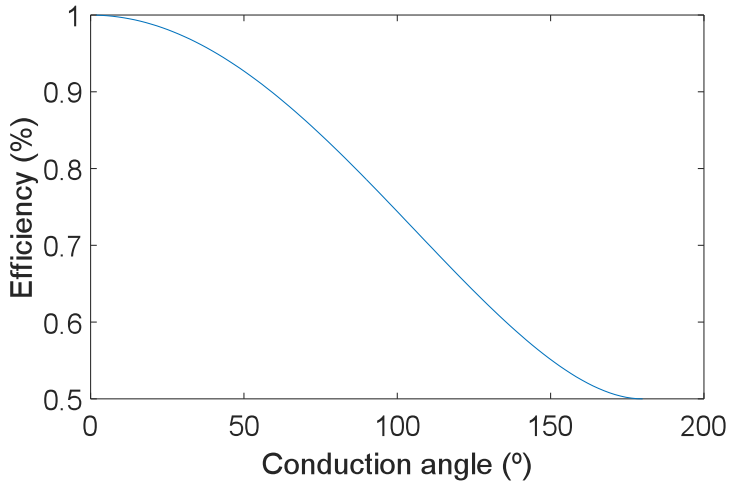
$$\eta_{max} = \frac{V_{DD}\dfrac{I_1}{2}}{V_{DD}\bar{i}_D} = \frac{2\phi - \sin 2\phi}{4(\sin\phi - \phi\cos\phi)}$$

$$P_{out} = \frac{1}{2}\frac{I_{max}}{2\pi}(2\phi - \sin 2\phi)V_{DD}$$

$$I_1 = \frac{I_{max}}{2\pi}(2\phi - \sin 2\phi), \quad \bar{i}_D = \frac{I_{max}}{\pi}(\sin\phi - \phi\cos\phi)$$

A medida que se reduce θ, la eficiencia tiende al 100%.

Sin embargo, la ganancia y la potencia de salida también tienden a cero al mismo tiempo.



A medida que se reduce Ø, la eficiencia tiende al 100%.

Clase C - Eficiencia

- Si θ tiende a cero, la ganancia y la potencia de salida también tienden a cero al mismo tiempo.
- El factor de utilización tiende a cero si la potencia de salida tiende a cero.
- Un compromiso aceptable suele estar alrededor de:

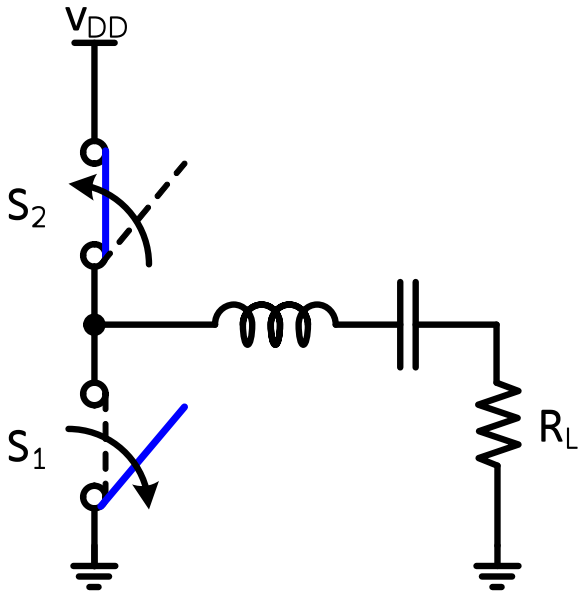
$$\eta_{max} = 85\%$$

$$\phi = 150^{o}$$

- Prestar atención al filtro de salida.

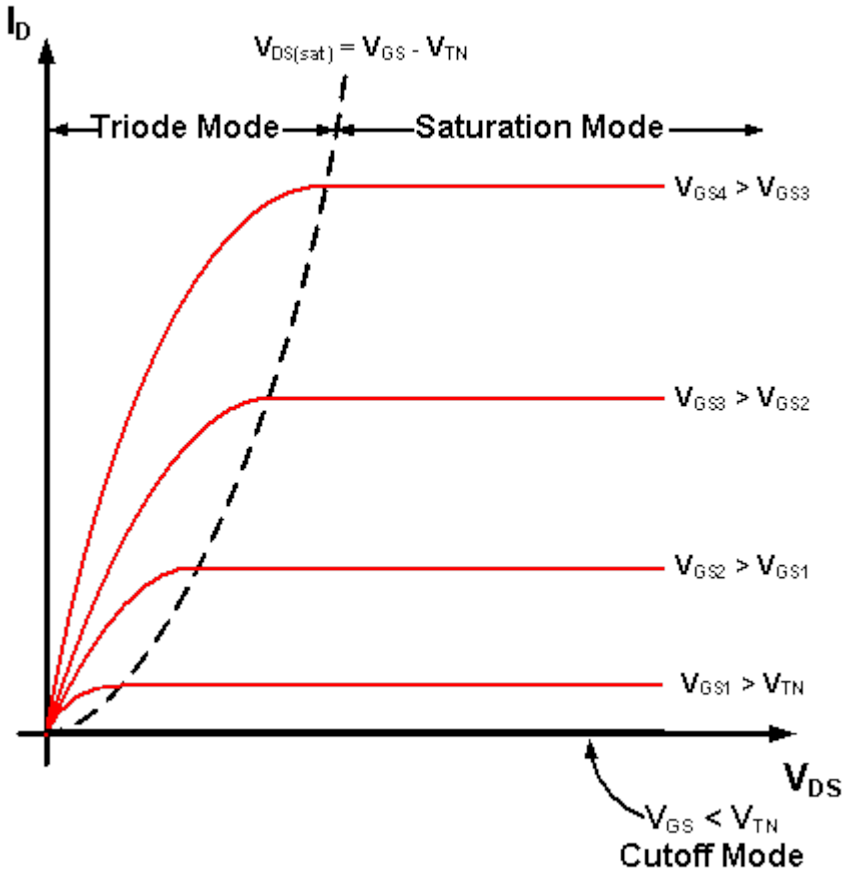
Clase D

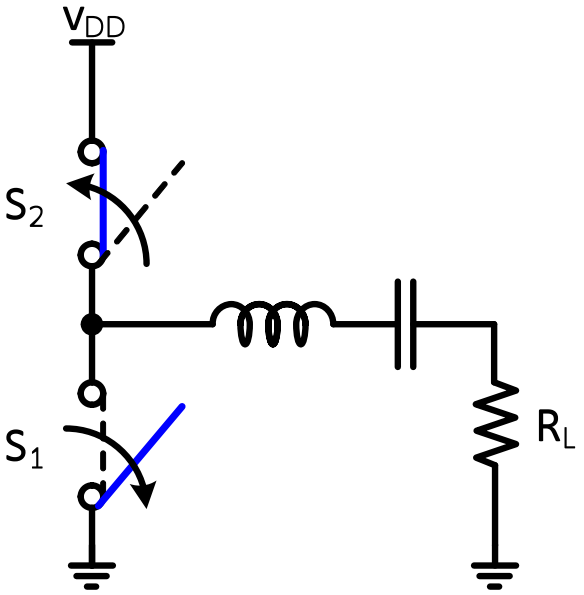
- A diferencia de las clases A, B, C, AB, no usa el transistor como fuente de corriente, sino mas bien como conmutador:
  - Un conmutador ideal no disipa potencia: V = 0 ó I = 0.
  - Si el producto V · I es siempre cero, la eficiencia será del 100%.



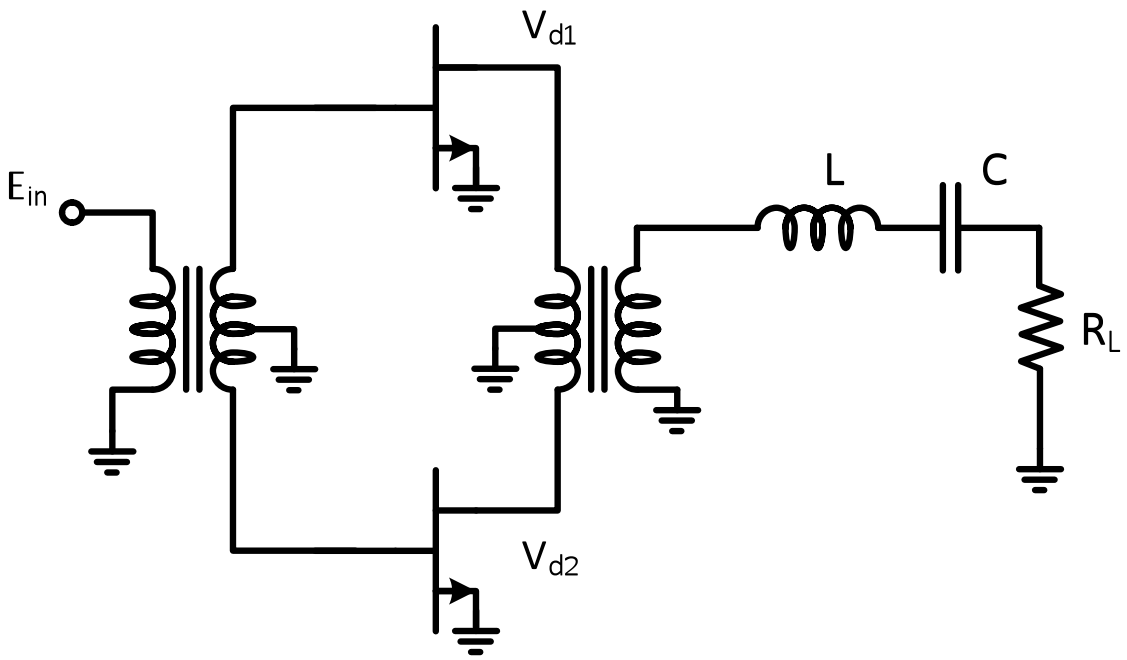
En la práctica se tiene resistencia (ON) y capacidad parásita (OFF).

Clase D


I_D
$V_{DS(sat)} = V_{GS} - V_{TN}$
Triode Mode
Saturation Mode
$V_{GS4} > V_{GS3}$
$V_{GS3} > V_{GS2}$
$V_{GS2} > V_{GS1}$
$V_{GS1} > V_{TN}$
V_{DS}
$V_{GS} < V_{TN}$
Cutoff Mode


V_{DD}
S_2
S_1
R_L

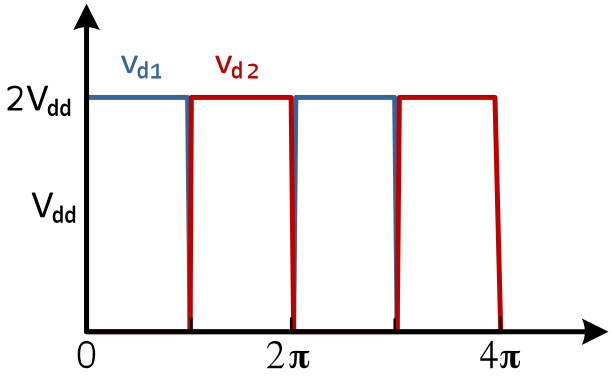
Clase D

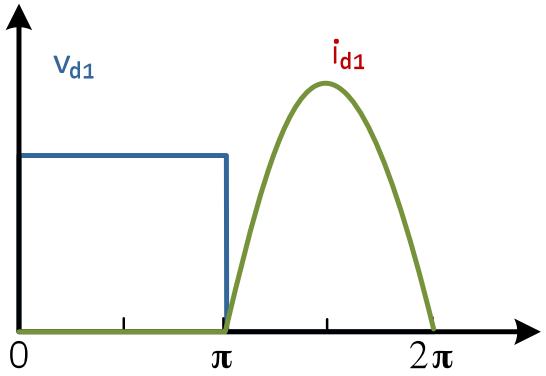


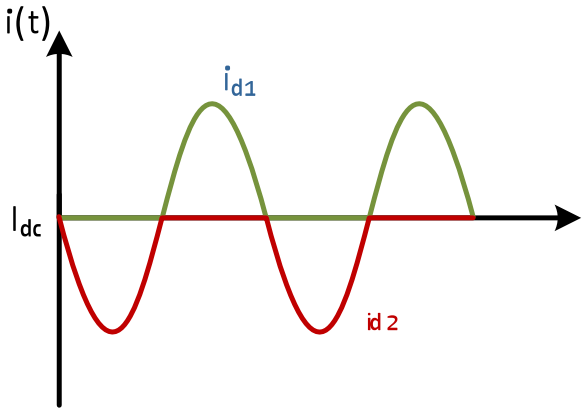
- El filtro de salida se conecta en serie, dado que la impedancia de transistor como conmutador es baja.
- La configuración a la entrada, permite que sólo un transistor conduzca a la vez.

Sokal Switchmode amplifiers.

Clase D - Principio de operación







- El voltaje de drenador conmuta de 0 a V_{dd} a la frecuencia de la señal de entrada.
- EL filtro LCR permite pasar solo a la componente fundamental del voltaje hacia la carga.
- Dado que la corriente solo circula por el dispositivo cuando el transistor está apagado (V_{ds} = 0), no se disipa potencia.

Clase D - Eficiencia

- 100% eficiencia con conmutadores ideales.
- La amplitud del voltaje a la fundamental sobre la carga:

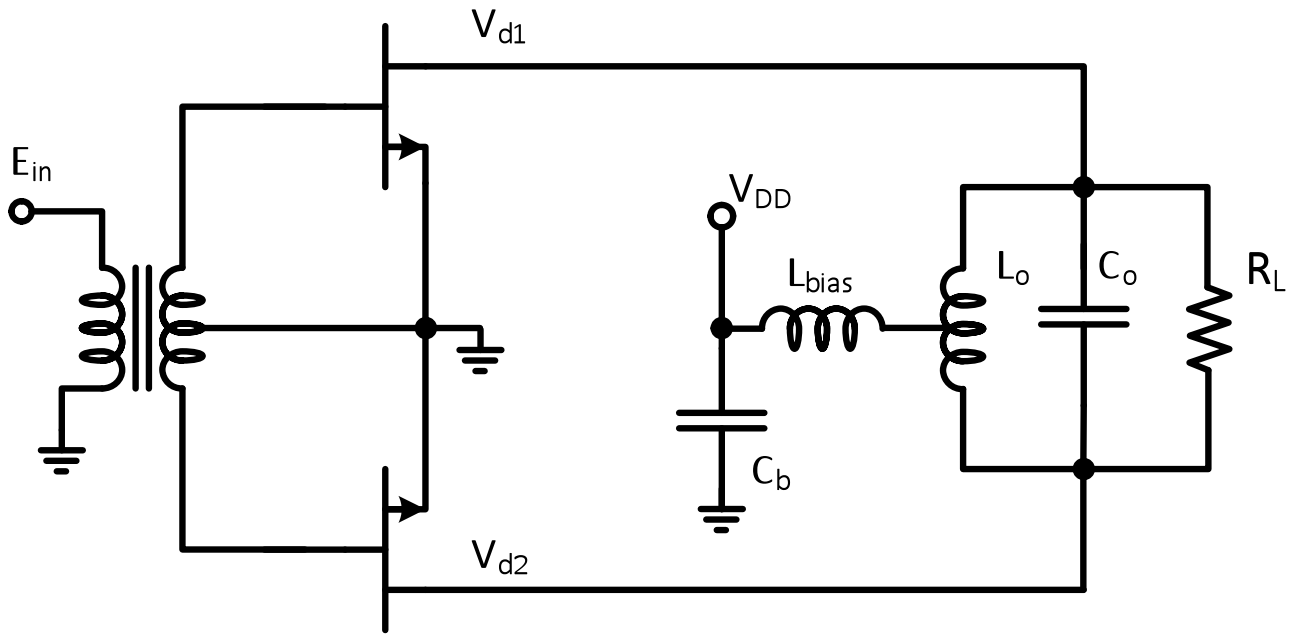
$$V_L = \frac{4}{\pi} V_{dd} \qquad P_L = \frac{1}{2}\frac{V_L^2}{R_L} = \frac{8}{\pi^2}\frac{V_{dd}^2}{R_L}$$

$$\eta = 100\%$$

$$I_{dc} = \frac{8}{\pi^2}\frac{V_{dd}}{R_L} \qquad P_{dc} = \frac{8}{\pi^2}\frac{V_{dd}^2}{R_L}$$

$$P_N = \frac{1}{\pi}$$

Clase D - Simétrico o complementario



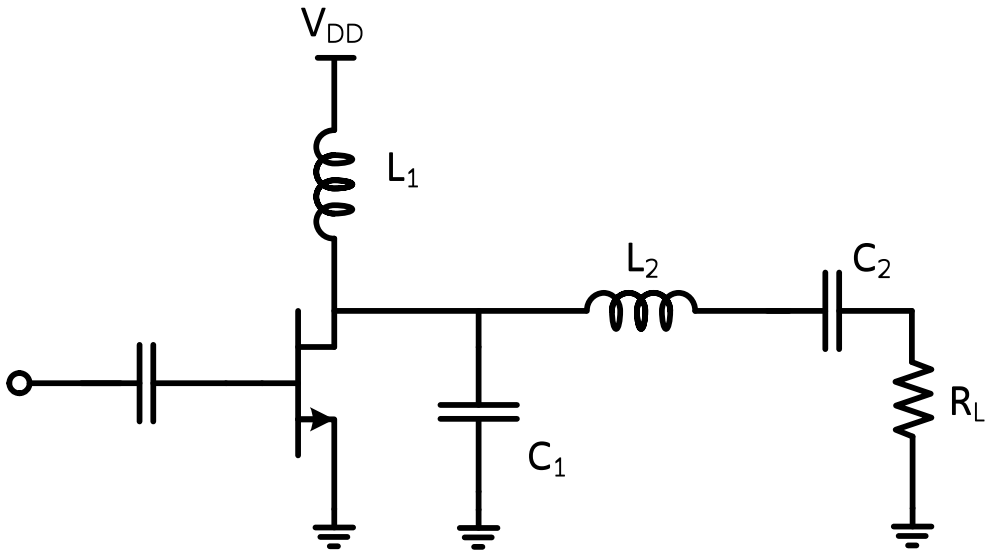
$$P_L = \frac{2}{\pi^2}\frac{V_{dd}^2}{R_L} \qquad P_{dc} = \frac{2}{\pi^2}\frac{V_{dd}^2}{R_L}$$

Clase D

- En la práctica no se encuentra un conmutador perfecto:
  - Resistencias y capacidades parásitas.
  - Tiempos de subida y bajada de las formas de onda.
- Debido a la limitaciones de la tecnología sólo se han reportado diseños a baja frecuencia (2.4 GHz, 2014).
- No proporciona amplificación lineal, pero en contrapartida es altamente eficiente.
- Los fabricantes no caracterizan los transistores para operar como conmutadores.

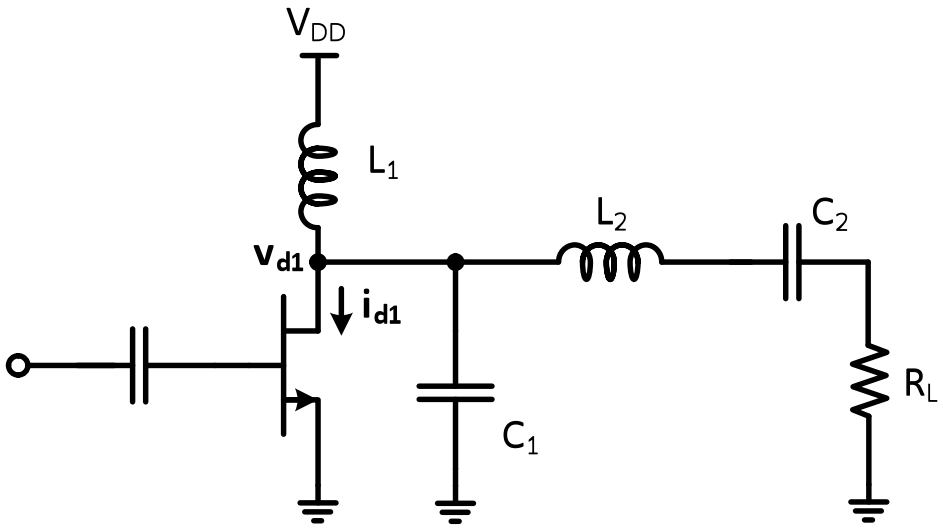
Clase E

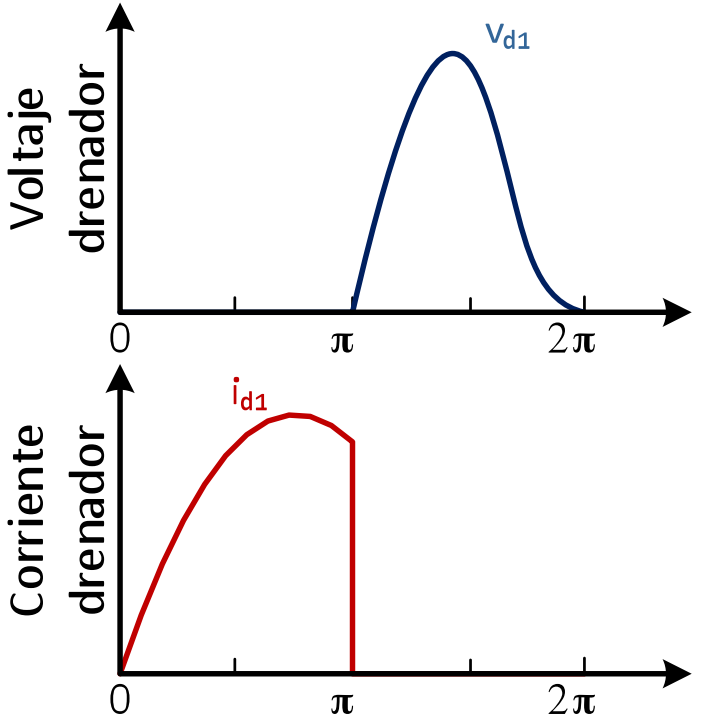
- En la clase E ideal, tanto v e i son cero durante el transitorio de conmutación.
- El voltaje cae a cero y tiene pendiente nula cuando el transistor comienza a conducir.



Emplea un solo transistor como conmutador.

Clase E - Principio de operación



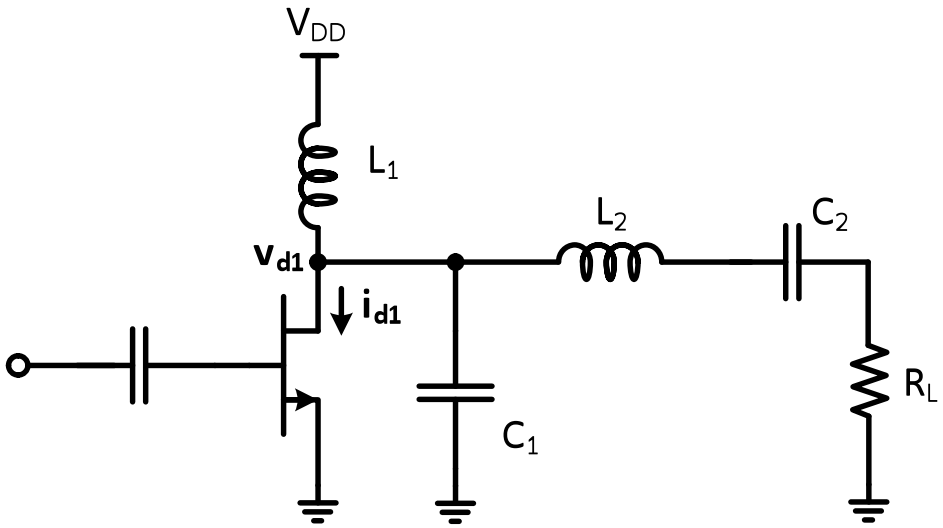


C_1 absorbe la capacidad de drenador.

$$\eta = 100\%$$

N. Sokal & A. Sokal (1975): *«Class E, a New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Power Amplifiers».* IEEE J. Solid-State Circuits, Jun., pp 168-176.

Clase E - Cálculo de elementos



$$L_2 = \frac{QR_L}{\omega}$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega R_L\left(\frac{\pi^2}{4}+1\right)\left(\frac{\pi}{2}\right)} \approx \frac{1}{\omega(R_L \cdot 5,447)}$$

$$C_2 = C\left(\frac{1}{\omega^2 L_2}\right)\left(1+\frac{1,42}{Q-2,08}\right)$$

$$R_L = 0,5768\left(\frac{V_{DD}^2}{P_{out}}\right)\left(1-\frac{0,451759}{Q_L}-\frac{0,402444}{Q_L^2}\right)$$

C_1 absorbe la capacidad de drenador.

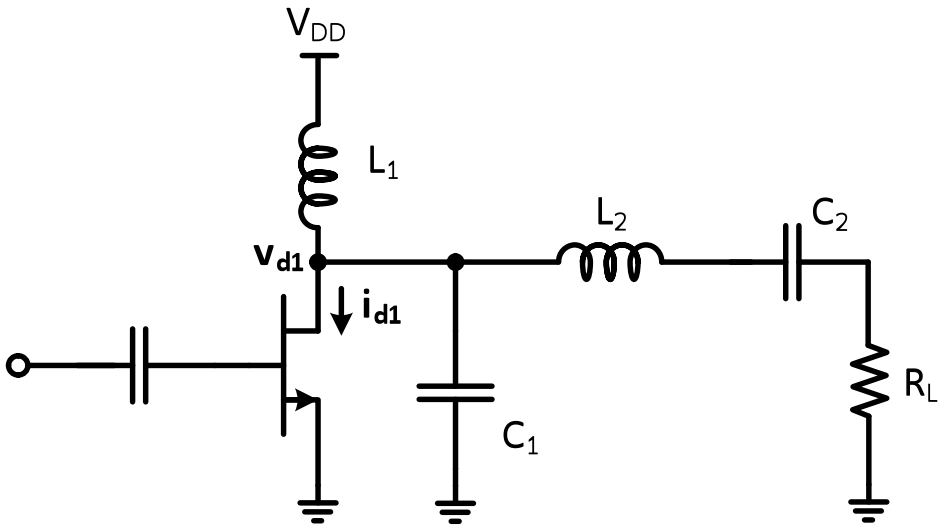
$$V_{ds,max} = 3,6V_{dd}$$

L_2 no resuena con C_2 a ω, ni con C_1 en serie con C_2.

$$i_{d,max} = \frac{1,7V_{dd}}{R_L}$$

N. Sokal & A. Sokal (1975): *«Class E, a New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Power Amplifiers».* IEEE J. Solid-State Circuits, Jun., pp 168-176.

Clase E - Eficiencia



$$P_L = \frac{2}{1+\frac{\pi^2}{4}} \frac{V_{dd}^{\ 2}}{R_L} \approx 0,577 \frac{V_{dd}^2}{R_L}$$

$$P_N = \frac{P_L}{V_{ds,max} I_{d,max}} \approx 0,0998$$

C_1 absorbe la capacidad de drenador.

L_2 no resuena con C_2 a la frecuencia f o con C_1 en serie con C_2.

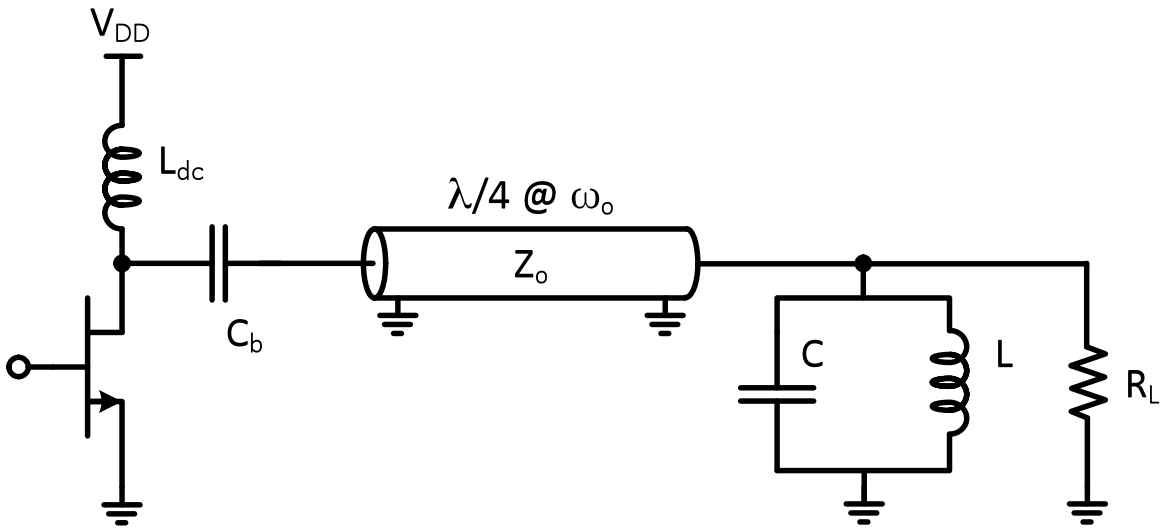
N. Sokal & A. Sokal (1975): *«Class E, a New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Power Amplifiers».* IEEE J. Solid-State Circuits, Jun., pp 168-176.

Clase F

Incrementa la eficiencia y potencia de salida usando resonadores armónicos en la salida para ajustar la formas de onda de drenador.

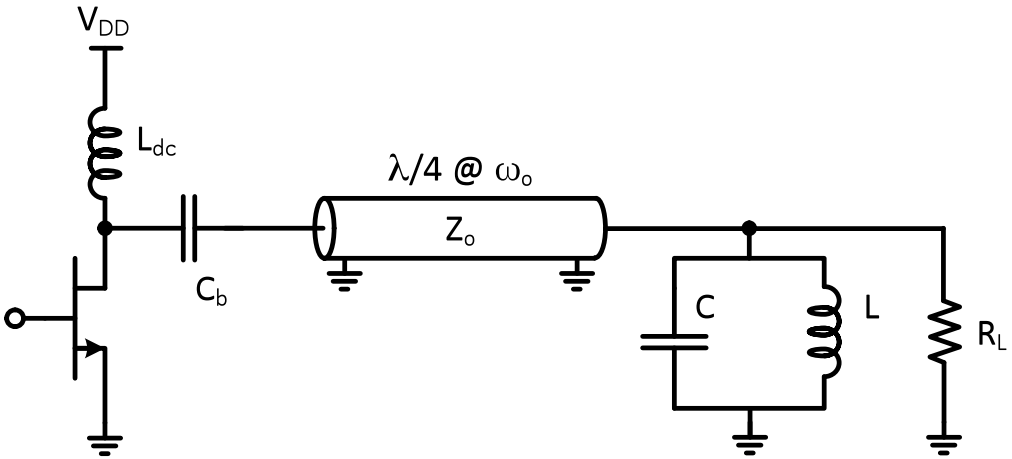
- Clase F ideal:

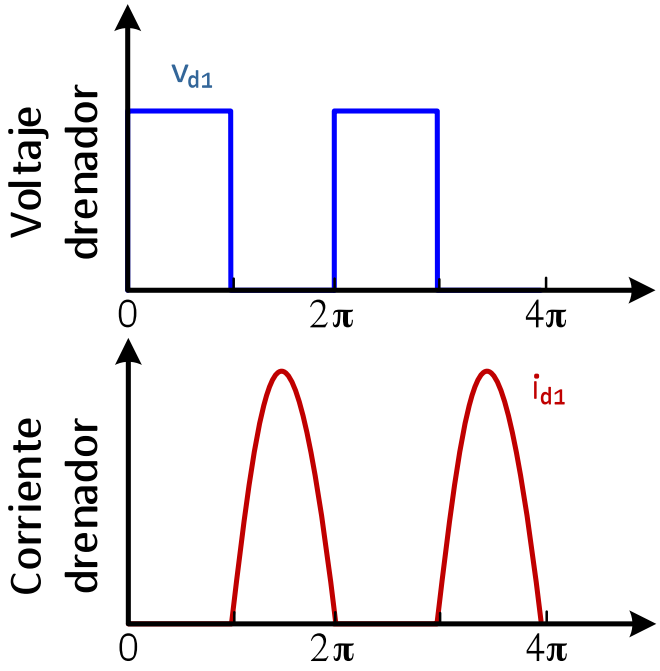
V_d –> onda cuadrada (100% eficiencia).



Implementación de las cargas armónicas con líneas de transmisión.

Clase F - Principio de funcionamiento

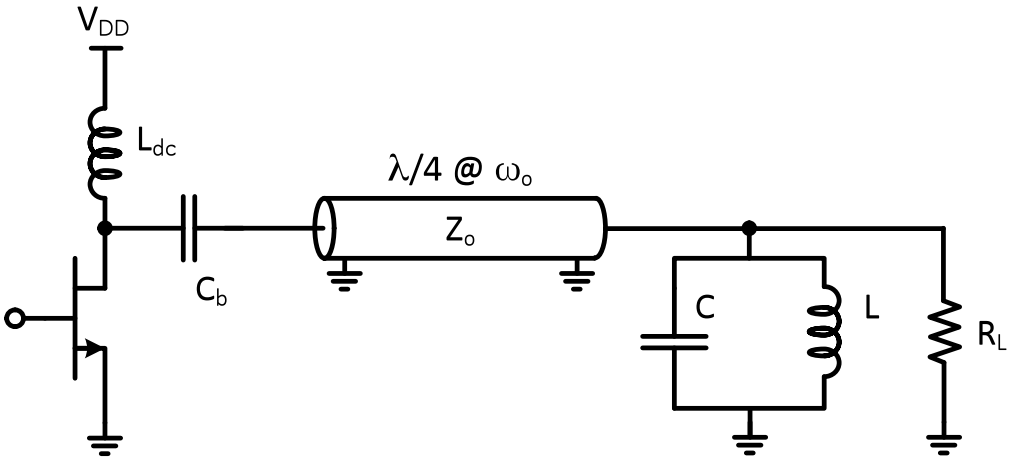




- Circuito abierto para los armónicos impares.
- Corto circuito para los armónicos pares.
- La red a la salida es más compleja, pero debe cumplir estas condiciones sólo a los armónicos:
  - Trampas o líneas de transmisión.

$$\eta = 100\%$$

Clase F



$$V_{ds,max} = \frac{4}{\pi} V_{dd}$$

$$i_{d,max} = \frac{8}{\pi} \frac{V_{dd}}{R_L}$$

$$P_L = \frac{\left(\frac{4}{\pi} V_{dd}\right)^2}{2R_L}$$

$$P_N = \frac{P_L}{V_{ds,max} I_{d,max}} = \frac{1}{2\pi} \approx 0{,}16$$

Comparativa

Clase	Modo	Ángulo de conducción	Potencia de salida	Máxima eficiencia	Ganancia	Linealidad
A	Fuente de corriente	100%	Media	50%	Grande	Buena
B		50%	Media	78,5%	Media	Media
C		<50%	Pequeña	100%	Pequeña	Pobre
D	Conmutación	50%	Grande	100%	Pequeña	Pobre
E		50%	Grande	100%	Pequeña	Pobre
F		50%	Grande	100%	Pequeña	Pobre

Técnicas avanzadas

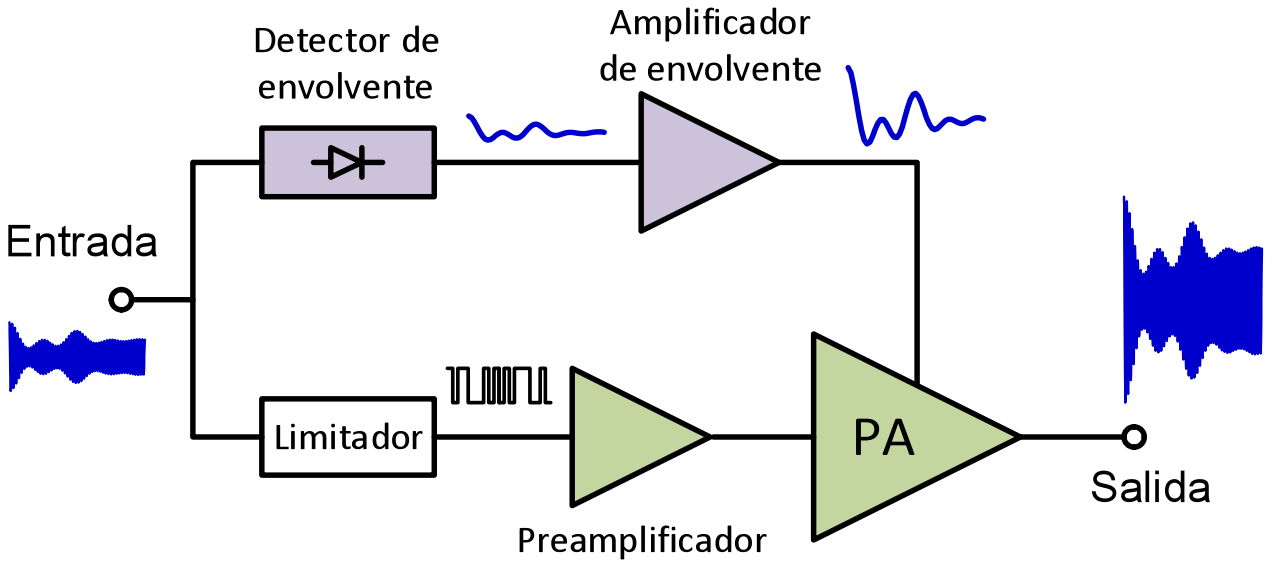
En la práctica se emplean diferentes arquitecturas para mejorar la eficiencia y linealidad de los amplificadores de potencia:

- Eliminación y recuperación de Envolvente.
- Seguimiento de envolvente.
- Outphasing.
- Doherty.

Eliminación y recuperación de Envolvente

Envelope Elimination and Restoration

Deconstruir la señal al inicio, reconstruyéndola en la etapa final de amplificación.

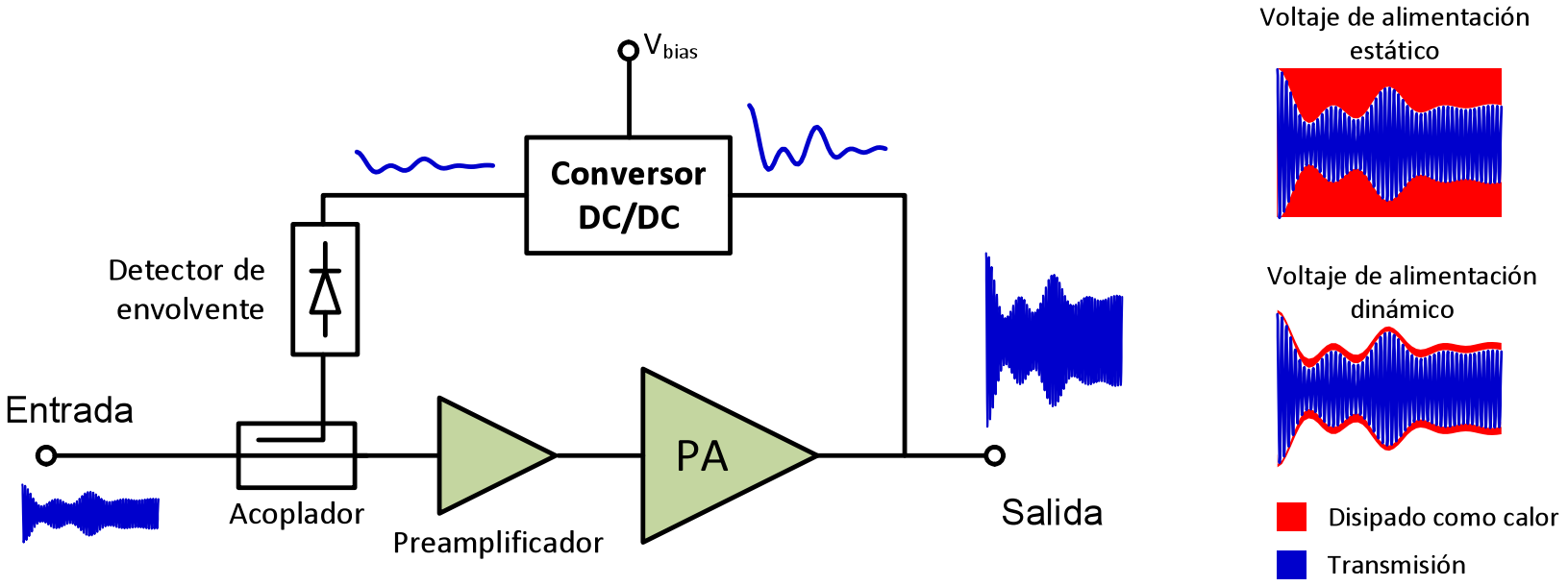


- Al quitar la modulación de amplitud puede utilizarse un amplificador de alta eficiencia y envolvente constante.
- Se modula la fuente de alimentación final para restaurar la componente de AM.

Seguimiento de envolvente

Envelope Tracking

Utilizar un amplificador lineal en la etapa de salida, pero modulando la fuente alimentación con un conversor DC/DC.

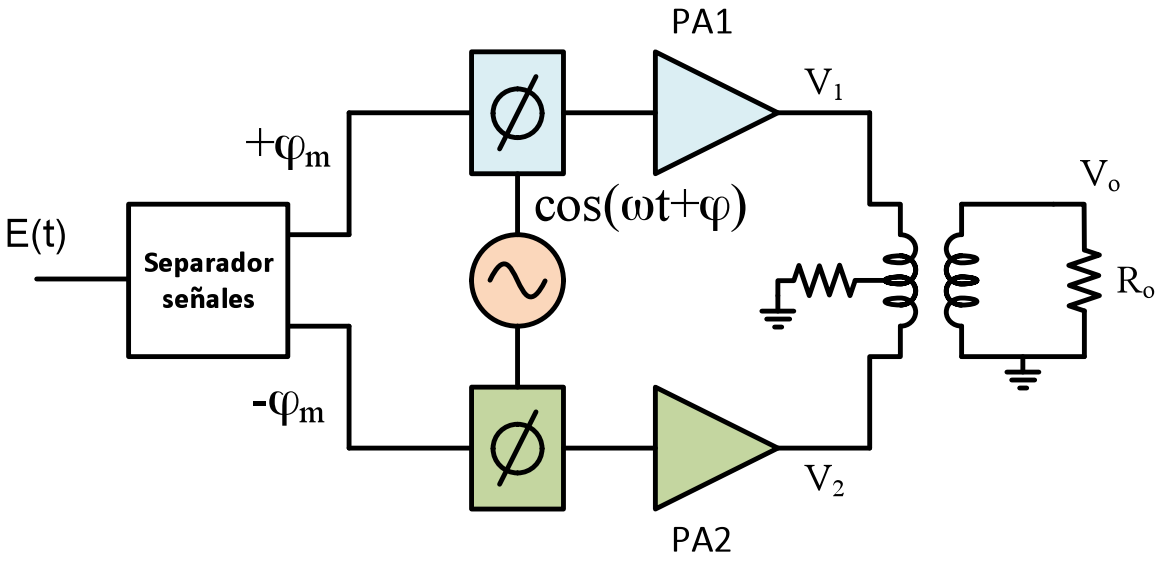


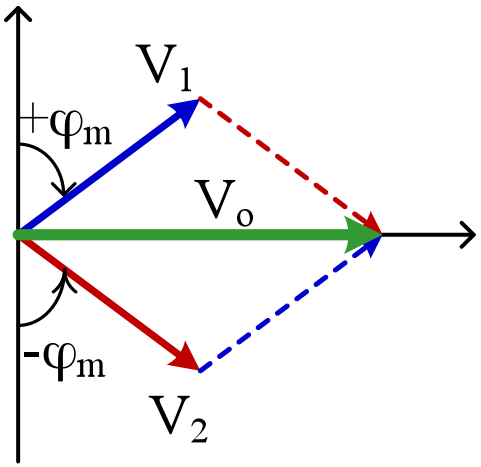
Se varía la alimentación de manera dinámica para conservar potencia:

- Cambia el punto quiescente.

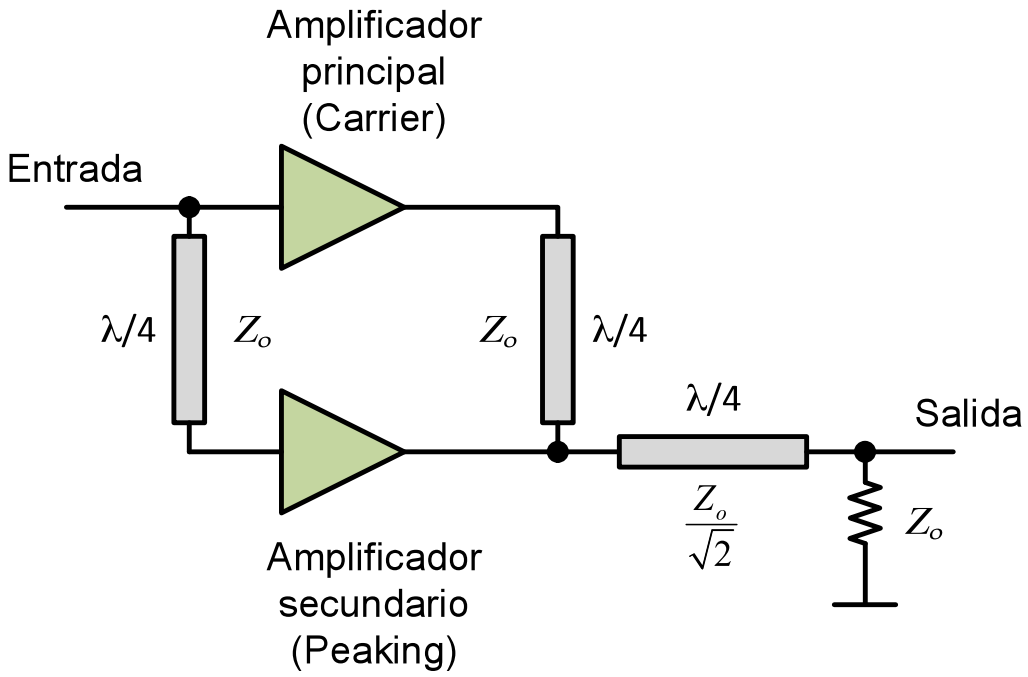
Outphasing

Se obtiene una señal modulada en amplitud combinando la salida de dos PAs cuyas salidas están moduladas en fase de manera independiente por la envolvente.





La envolvente E modula en fase los dos amplificadores para producir una señal proporcional a E en la salida.

Doherty

- Se utiliza el amplificador superior (Carrier) en cla-se B y un amplifica-dor auxiliar (Peaking) en clase C.
- Para bajos niveles de entrada, sólo se utiliza el amplificador supe-rior, para valores más altos, se utiliza el infe-rior.