

## Amplificadores de potencia de RF clase F

El amplificador de potencia clase F emplea circuitos resonantes de armónica con el objetivo de reducir las pérdidas y elevar la eficiencia

Los amplificadores de potencia clase F con circuitos resonantes sintonizados en la tercera ó quinta armónica se utilizan generalmente en modulación de amplitud de alta potencia, en transmisores de radiodifusión en baja frecuencia LF (30 - 300KHz), frecuencia media MF (0.3 - 3MHz) y alta frecuencia HF (3 - 30MHz), VHF (30 - 300MHz), FM, UHF (300MHz - 3GHz).

## Clasificación de los amplificadores clase F

### De armónicas impares

- Tercera armónica
- Tercera y quinta armónica
- Tercera, quinta y séptima armónica

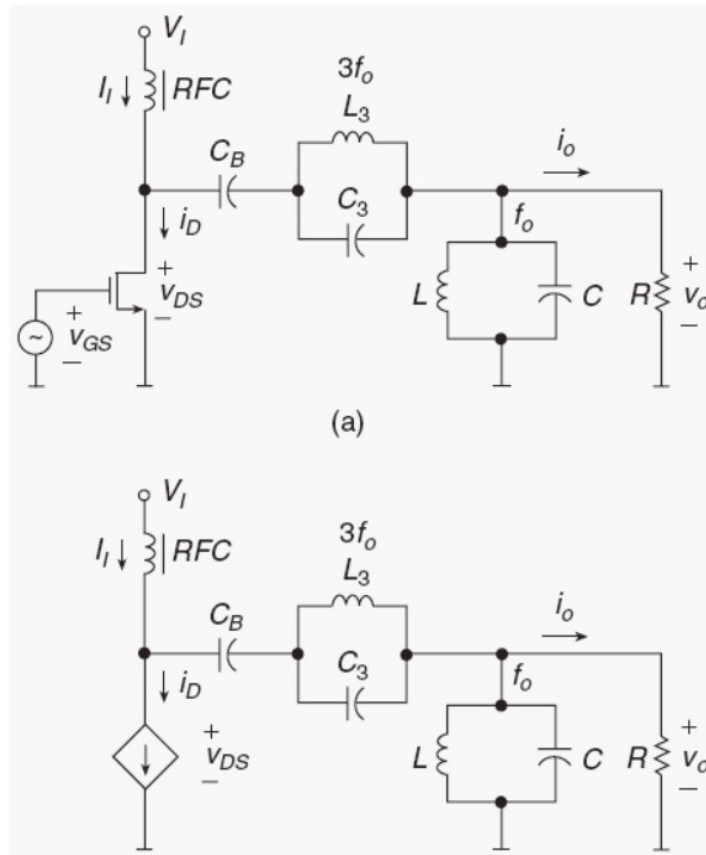
### De armónicas pares

- Segunda armónica
- Segunda y cuarta armónica
- Segunda, cuarta y sexta armónica

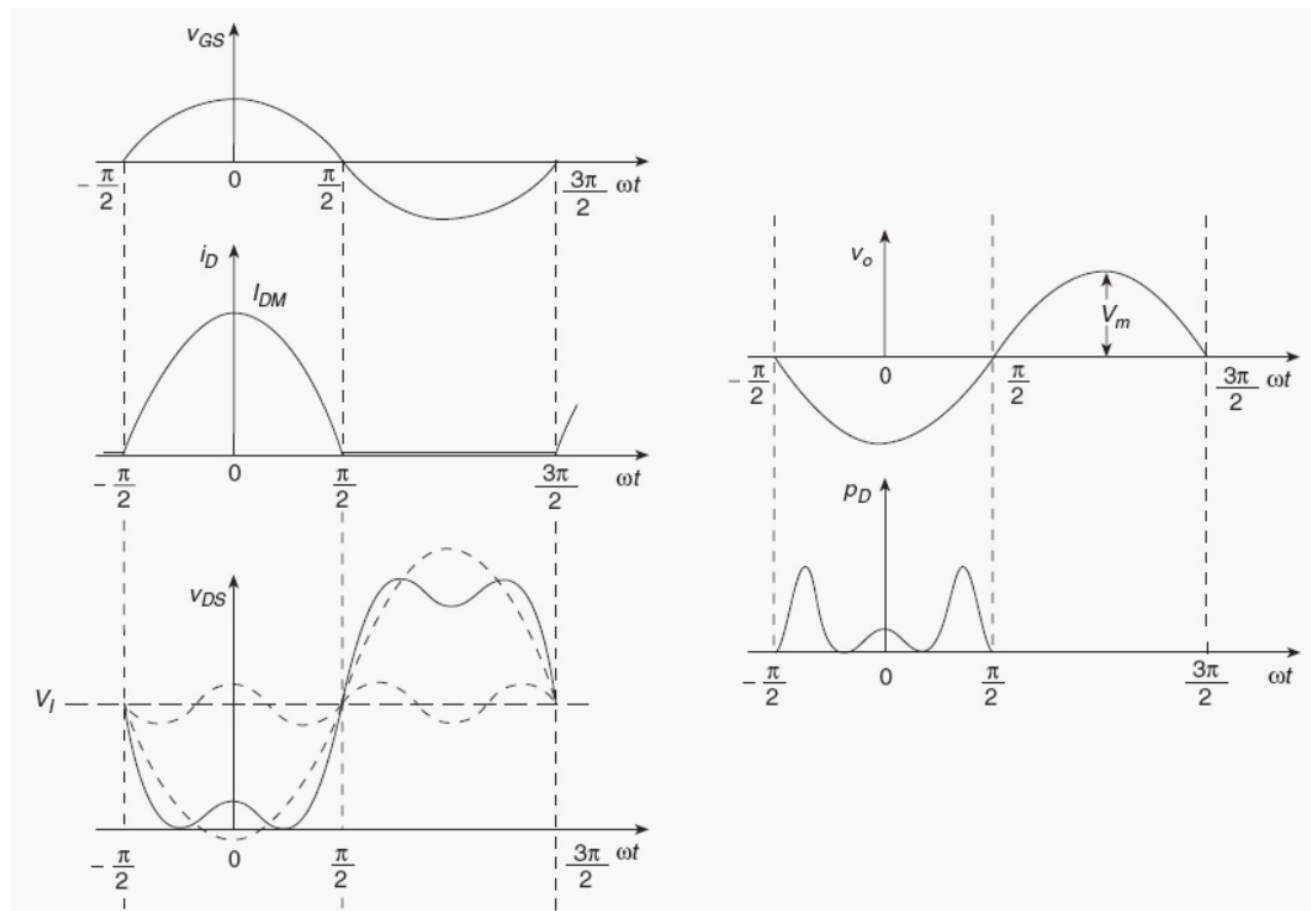
Máximo aplanamiento del voltaje drenaje-fuente  $V_{DS}$

Máxima eficiencia de la terminal drenaje

## ***Amplificador de potencia clase F con tercera armónica***



## ***Formas de onda del amplificador clase F con tercera armónica***



La corriente en la terminal drenaje es un semiciclo dado por:

$$i_D = \begin{cases} I_{DM} \cos \omega_o t & \text{for } -\frac{\pi}{2} < \omega_o t \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{for } \frac{\pi}{2} < \omega_o t \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

Voltaje de salida sinusoidal dado por:

$$v_o = -V_m \cos \omega_o t$$

Voltaje de la fundamental en  $V_{DS}$  es:

$$v_{ds1} = v_o = -V_m \cos \omega_o t$$

Voltaje en el circuito resonante de tercera armónica:

$$v_{ds3} = V_{m3} \cos 3\omega_o t.$$

Entonces el voltaje en  $V_{DS}$  es:

$$v_{DS} = V_I + v_{ds1} + v_{ds3} = V_I - V_m \cos \omega_o t + V_{m3} \cos 3\omega_o t$$

La forma de onda en  $V_{DS}$  cambia a medida que la relación  $V_{m3}/V_m$  se incrementa

Caso 1.  $0 < V_{m3}/V_m < 1/9$

La forma de onda de  $V_{DS}$  tiene su máximo valor en  $\omega_o t = \pi$  y el mínimo ocurre en  $\omega_o t = 0$

El valor pico de la componente AC en  $V_{DS}$  es

$$V_{pk} = V_I - V_{DSmin} = V_I - v_{DS}(0) = V_I - V_I + V_m - V_{m3} = V_m - V_{m3}$$

Para un transistor ideal  $V_{DSmin} = 0$  y  $V_{pk} = V_I$

Entonces:

$$\frac{V_m}{V_{pk}} = \frac{V_m}{V_I} = \frac{V_m}{V_m - V_{m3}} = \frac{1}{1 - \frac{V_{m3}}{V_m}}$$

Al tiempo que se incrementa  $V_{m3}/V_m$  también se incrementa  $V_m/V_I$

Caso 2.  $V_{m3}/V_m = 1/9$

La forma de onda de  $V_{DS}$  alcanza su máximo aplanamiento

Caso 3.  $V_{m3}/V_m > 1/9$

La forma de onda de  $V_{DS}$  presenta un rizo con doble pico (como el de la figura)

La relación  $V_m/V_I$  alcanza su máximo valor en  $V_{m3}/V_m = 1/6$  dado por:  $\frac{V_m}{V_{pk}} = \frac{V_m}{V_I} = \frac{2}{\sqrt{3}}$

Caso 4.  $V_{m3}/V_m > 1/6$

La forma de onda de  $V_{DS}$  tiene doble valle y un pico en la parte baja, y doble pico y un valle en la parte alta.

La relación  $V_m/V_{pk}$  decrece a medida que  $V_{m3}/V_m$  se incrementa

### *Máximo aplanamiento*

La forma de onda de  $V_{DS}$  alcanza su máximo aplanamiento  $\frac{V_{m3}}{V_m} = \frac{1}{9}$

Idealmente el voltaje de drenaje a fuente mínimo es

$$V_{DSmin} = v_{DS}(0) = V_I - V_m + V_{m3} = V_I - V_m + \frac{V_m}{9} = V_I - \frac{8}{9}V_m = 0$$

produciendo la máxima amplitud del voltaje de salida  $V_m = \frac{9}{8}V_I$

similarmente:  $V_{DSmin} = v_{DS}(0) = V_I - V_m + V_{m3} = V_I - 9V_{m3} + V_{m3} = V_I - 8V_{m3} = 0$

produciendo la amplitud de la tercera armónica  $V_{m3} = \frac{V_I}{8}$ .

Máximo voltaje  $V_{DS}$  es:

$$V_{DSM} = v_{DS}(\pi) = V_I + V_m - V_{m3} = V_I + \frac{9}{8}V_I - \frac{1}{8}V_I = 2V_I$$



La corriente de carga es igual a la componente fundamental de la corriente en la terminal drenaje:

$$i_o = i_{d1} = I_m \cos \omega_o t$$

donde:

$$I_m = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} i_D \cos \omega_o t \, d(\omega_o t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} I_{DM} \cos^2 \omega_o t \, d(\omega_o t) = \frac{I_{DM}}{2}$$

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{9(V_I - V_{DSmin})}{8R}.$$

La corriente de entrada de DC es igual a la corriente de la terminal drenaje:

$$I_I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} i_D \, d(\omega_o t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} I_{DM} \cos \omega_o t \, d(\omega_o t) = \frac{I_{DM}}{\pi} = \frac{2}{\pi} I_m = \frac{9(V_I - V_{DSmin})}{4\pi R}$$

La potencia de entrada de DC está dada por:

$$P_I = V_I I_I = \frac{9V_I(V_I - V_{DSmin})}{4\pi R} = \frac{9V_I(V_I - V_{DSmin})}{4\pi R}$$

Potencia de salida:

$$P_O = \frac{V_m^2}{2R} = \frac{81(V_I - V_{DSmin})^2}{128R} = 0.6328 \frac{(V_I - V_{DSmin})^2}{R}$$

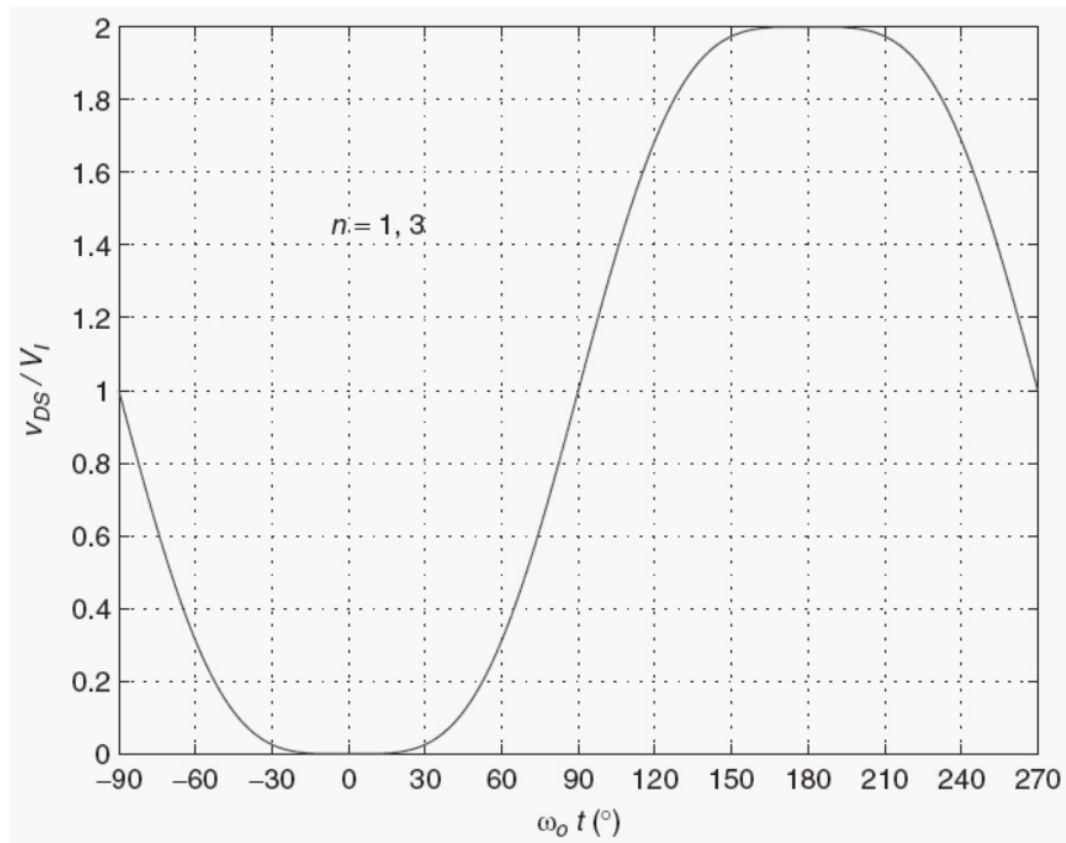
Eficiencia:

$$\begin{aligned}\eta_D &= \frac{P_O}{P_I} = \frac{1}{2} \left( \frac{I_m}{I_I} \right) \left( \frac{V_m}{V_I} \right) = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{2} \times \left( \frac{V_m}{V_I} \right) = \frac{\pi}{4} \frac{V_m}{V_I} = \frac{\pi}{4} \times \frac{9}{8} \left( 1 - \frac{V_{DSmin}}{V_I} \right) \\ &= \frac{9\pi}{32} \left( 1 - \frac{V_{DSmin}}{V_I} \right) = 0.8836 \left( 1 - \frac{V_{DSmin}}{V_I} \right)\end{aligned}$$

Resistencia de entrada de DC:

$$R_{DC} = \frac{V_I}{I_I} = \frac{4\pi}{9} R \approx 1.396R$$

**Máximo aplanamiento de  $V_{DS}$  en  $\frac{V_{m3}}{V_m} = \frac{1}{9}$**



*Ejemplo:*

Diseñar un amplificador de potencia clase F con tercera armónica, máximo aplanamiento de voltaje  $V_{DS}$  que proporcione a la salida 10W a una frecuencia de 800MHz y ancho de banda de 100MHz. La fuente de alimentación de DC es de 12V y  $V_{DSmin} = 1V$ .

*Solución:*

Amplitud máxima de la fundamental en  $V_{DS}$ : 
$$V_m = \frac{9}{8}(V_I - V_{DSmin}) = \frac{9}{8}(12 - 1) = 12.375 \text{ V}$$

Amplitud máxima de la tercera armónica: 
$$V_{m3} = \frac{V_m}{9} = \frac{12.375}{9} = 1.375 \text{ V}$$

Resistencia de carga: 
$$R = \frac{V_m^2}{2P_O} = \frac{12.375^2}{2 \times 10} = 7.657 \Omega$$

Máximo voltaje en  $V_{DS}$ : 
$$V_{DSmax} = 2V_I = 2 \times 12 = 24 \text{ V}$$

Amplitud de la fundamental de la corriente en la terminal drenaje,  $I_m$   $I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{12.375}{7.657} = 1.616 \text{ A}$

Máxima corriente de drenaje:  $I_{DM} = 2I_m = 2 \times 1.616 = 3.232 \text{ A}$

Corriente de alimentación de DC:  $I_I = \frac{I_{DM}}{\pi} = \frac{3.232}{\pi} = 1.029 \text{ A}$

Potencia de la fuente de alimentación:  $P_I = I_I V_I = 1.029 \times 12 = 12.348 \text{ W}$

Potencia de pérdidas de la terminal drenaje del transistor:  $P_D = P_I - P_O = 12.348 - 10 = 2.348 \text{ W}$

Eficiencia de la terminal drenaje:  $\eta_D = \frac{P_O}{P_I} = \frac{10}{12.348} = 80.98 \%$

Resistencia de DC presentada por el amplificador a la fuente de alimentación:

$$R_{DC} = \frac{4\pi}{9}R = 1.396 \times 7.657 = 10.689 \Omega$$

Factor de calidad efectivo

$$Q_L = \frac{f_c}{BW} = \frac{800}{100} = 8$$

Inductancia del circuito sintonizado en la fundamental

$$L = \frac{R}{\omega_c Q_L} = \frac{7.657}{2\pi \times 0.8 \times 10^9 \times 8} = 0.19 \text{ nH}$$

Capacitancia del mismo circuito resonante:

$$C = \frac{Q_L}{\omega_c R} = \frac{8}{2\pi \times 0.8 \times 10^9 \times 7.657} = 207.855 \text{ pF}$$

### Máxima eficiencia de la terminal drenaje

La máxima eficiencia de la terminal drenaje del transistor  $\eta_D$  y la máxima potencia de salida no ocurre para máximo aplanamiento del voltaje  $V_{DS}$ , sino cuando la forma de onda  $V_{DS}$  tiene ligeros rizados, en

$$\frac{V_{m3}}{V_m} = \frac{1}{6} \approx 0.1667$$

donde:  $\frac{V_m}{V_I} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.1547$  entonces:  $V_{m3} = \frac{V_m}{6} = \frac{V_I}{3\sqrt{3}}$  y  $\frac{V_{m3}}{V_I} = \frac{1}{3\sqrt{3}} \approx 0.19245$

El mínimo valor de  $V_{DS}$  ocurre en:

$$\omega_o t_m = \pm \arcsin \sqrt{\frac{9V_{m3} - V_m}{12V_{m3}}} = \pm \arcsin \left( \frac{1}{2} \right) = \pm 30^\circ$$

En general, la eficiencia de la terminal drenaje del transistor está dado por:

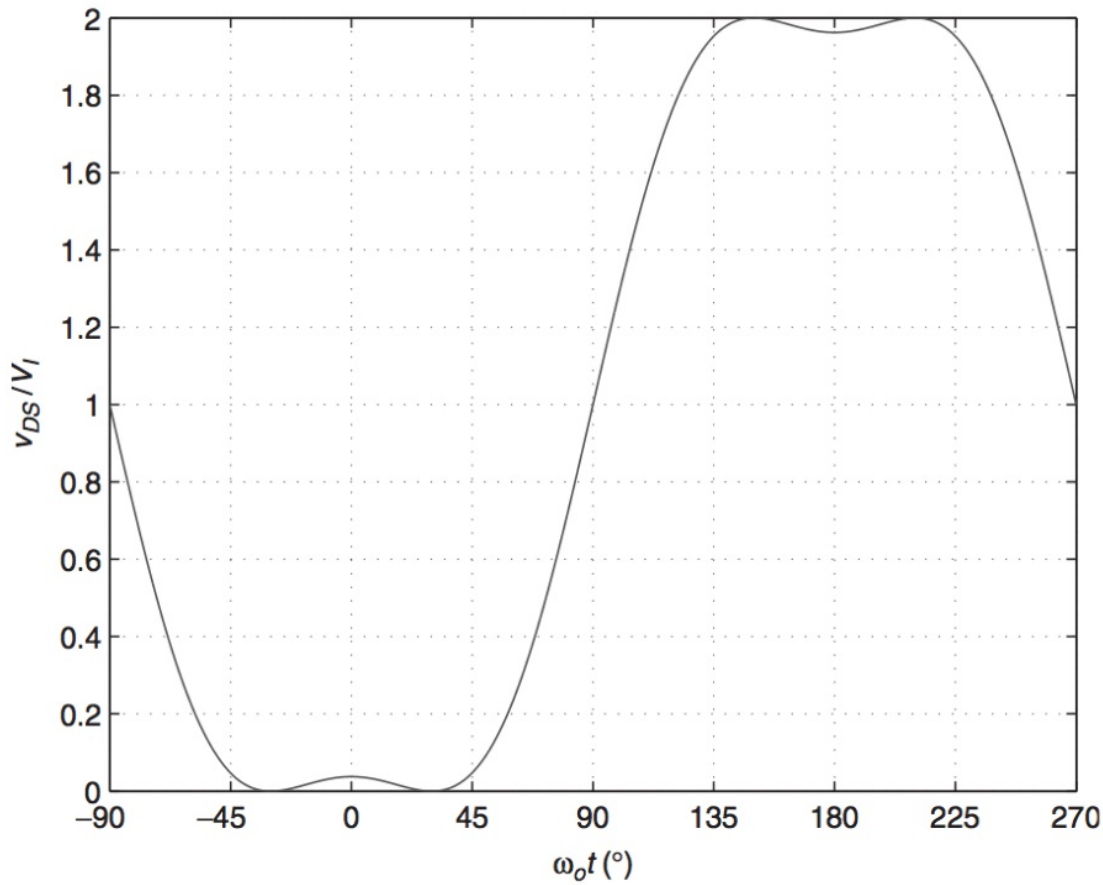
$$\eta_D = \frac{\pi}{4\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{V_m}{12V_{m3}} \left( \frac{2}{3} + \frac{2V_{m3}}{V_m} \right)}} \quad \text{for} \quad \frac{V_{m3}}{V_m} \geq \frac{1}{9}$$

y por tanto para  $\frac{V_{m3}}{V_m} = \frac{1}{6}$  se tiene que  $\eta_D = \frac{P_O}{P_I} = \frac{1}{2} \frac{I_m}{I_I} \frac{V_m}{V_I} = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{2} \times \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 90.67 \%$

El máximo voltaje  $V_{DS}$  es  $V_{DSM} = 2V_I$

La resistencia DC presentada por el amplificador a la fuente de alimentación es:

$$R_{DC} = \frac{V_I}{I_I} = \frac{\pi\sqrt{3}}{2}R \approx 1.36R.$$





*Ejemplo:*

Diseñar un amplificador de potencia clase F con tercera armónica, máxima eficiencia de la terminal drenaje  $\eta_D$  que proporcione a la salida 10W a una frecuencia de 800MHz y ancho de banda de 100MHz. La fuente de alimentación de DC es de 12V y  $V_{DSmin} = 1V$ .

*Solución:*

Amplitud máxima de la fundamental en  $V_{DS}$ : 
$$V_m = \frac{2}{\sqrt{3}}(V_I - V_{DSmin}) = 1.1547(12 - 1) = 12.7 \text{ V.}$$

Amplitud máxima de la tercera armónica: 
$$V_{m3} = \frac{V_m}{6} = \frac{12.7}{6} = 2.117 \text{ V}$$

Resistencia de carga: 
$$R = \frac{V_m^2}{2P_O} = \frac{12.7^2}{2 \times 10} = 8.0645 \Omega$$

Máximo voltaje en  $V_{DS}$ : 
$$V_{DSmax} = 2V_I = 2 \times 12 = 24 \text{ V}$$

Amplitud de la fundamental de la corriente en la terminal drenaje,  $I_m$   $I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{12.7}{8.0645} = 1.575 \text{ A}$

Máxima corriente de drenaje:  $I_{DM} = 2I_m = 2 \times 1.575 = 3.15 \text{ A}$

Corriente de alimentación de DC:  $I_I = \frac{I_{DM}}{\pi} = \frac{3.15}{\pi} = 1.00267 \text{ A}$

Potencia de la fuente de alimentación:  $P_I = I_I V_I = 1.00267 \times 12 = 12.03204 \text{ W}$

Potencia de pérdidas de la terminal drenaje del transistor:  $P_D = P_I - P_O = 12.03204 - 10 = 2.03204 \text{ W}$

Eficiencia de la terminal drenaje:  $\eta_D = \frac{P_O}{P_I} = \frac{10}{12.03204} = 83.11 \%$

Resistencia de DC presentada por el amplificador a la fuente de alimentación:

$$R_{DC} = \frac{\pi\sqrt{3}}{4}R \approx 1.36 \times 8.0645 = 10.97 \, \Omega$$

Factor de calidad efectivo  $Q_L = \frac{f_c}{BW} = \frac{800}{100} = 8.$

Inductancia del circuito sintonizado en la fundamental

$$L = \frac{R}{\omega_c Q_L} = \frac{8.0645}{2\pi \times 0.8 \times 10^9 \times 8} = 0.2 \, \text{nH}$$

Capacitancia del mismo circuito resonante:

$$C = \frac{Q_L}{\omega_c R} = \frac{8}{2\pi \times 0.8 \times 10^9 \times 8.0645} = 197.35 \, \text{pF}$$