

Amplificadores de Potencia, Conceptos básicos

J. I. Huircan

Abstract—Los amplificadores de potencia son convertidores que transforman la energía de la fuente en señal de potencia de salida. Estos pueden ser tipo clase A, AB, B y C. Los cuales tienen distintos parámetros de eficiencia y uso.

Index Terms—Power Amplifier.

I. INTRODUCTION

Un amplificador de potencia convierte la potencia de una fuente de corriente continua (Polarización V_{CC} de un circuito con transistores), usando el control de una señal de entrada, a potencia de salida en forma de señal. Si sobre la carga se desarrolla una gran cantidad de potencia, el dispositivo deberá manejar una gran excursión en voltaje y corriente.

Los puntos de operación deben estar en un área permitida de voltaje y corriente que asegure la máxima disipación, (SOA, Safe Operating Area). Se deben considerar los voltajes de ruptura y efectos térmicos permitidos en los dispositivos de estado sólido, considerar las características no lineales en el funcionamiento y usar los parámetros para gran señal del dispositivo.

La curva muestra las características de emisor y colector de un transistor,

II. CLASIFICACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES DE POTENCIA

Existen cuatro clasificaciones básicas de amplificadores de potencia: A, AB, B y C. En clase A, el amplificador está polarizado de tal forma que la corriente por el colector fluye durante el ciclo completo de la señal de entrada. Para clase AB, la polarización del amplificador es de tal forma que la corriente de colector solamente fluye para un lapso menor a los 360° y mayor a los 180° de la onda correspondiente. Para el funcionamiento en clase B, la corriente I_C fluirá solo durante 180° de la onda de entrada. Finalmente, para funcionamiento en clase C, el dispositivo conducirá durante un periodo inferior a los 180° correspondiente a la onda de entrada. La Fig. , muestra el comportamiento de los distintas clases.

Los amplificadores tipo AB y B usan configuraciones transistorizadas llamadas push-pull.

Cada uno de estos amplificadores posee características de eficiencia y distorsión distintos, por lo cual, sus aplicación será a distintas áreas.

III. RELACIONES BÁSICAS EN LOS AMPLIFICADORES DE POTENCIA

Para analizar los amplificadores de potencia se requiere de ciertas cantidades y relaciones. Como el amplificador de potencia convierte la potencia de cc de la fuente de

alimentación en una señal de potencia en la carga, la eficiencia de este proceso está dada por

$$\eta = \frac{P_{L(AC)}}{P_{CC}} \quad (1)$$

Donde η es la eficiencia, $P_{L(AC)}$, es la *potencia media de señal en la carga* y P_{CC} , la *potencia media de salida* en la fuente de alimentación.

El peak instantáneo y la potencia media disipada en el dispositivo de amplificación, considerando un transistor bipolar como dispositivo de potencia, se tiene

$$P_{CE} = P_{CC} - P_L \quad (2)$$

Donde P_{CE} es la disipación media de colector, P_L es la potencia total, es decir, potencia cc más potencia ca en la carga.

Para la evaluación de las distintas cantidades de potencia, se usa la relación básica dada por (3), donde p es la potencia instantánea, v e i son el voltaje y la corriente instantáneos.

$$p = vi \quad (3)$$

Si se considera que v e i son formas de onda periódica, con componente media (cc), la cual puede ser cero y una componente de ca, no necesariamente sinusoidal, así se tendrá

$$v = V_{dc} + v_{ac} \quad (4)$$

$$i = I_{dc} + I_{ac} \quad (5)$$

Tomando el periodo completo de la onda, se tiene que

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p \cdot d\omega t \\ &= \frac{V_{dc} I_{dc}}{P_{dc}} + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{ac} i_{ac} d\omega t \end{aligned} \quad (6)$$

Donde, P_{dc} es la contribución de la componente continua y P_{ac} es la contribución de la componente alterna a la potencia media. Si las componentes de ca son tipo sinusoidal, se tiene

$$v_{ac} = V_m \cos \omega t \quad (7)$$

$$i_{ac} = I_m \cos \omega t \quad (8)$$

Reemplazando en la ecuación (6), se tiene

$$\begin{aligned}
P &= V_{dc}I_{dc} + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [(V_m \cos \omega t) (I_m \cos \omega t)] d\omega t \\
&= V_{dc}I_{dc} + \frac{V_m I_m}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\cos^2 \omega t] d\omega t \\
&= V_{dc}I_{dc} + \frac{V_m I_m}{2\pi} \pi = V_{dc}I_{dc} + \frac{V_m I_m}{2}
\end{aligned} \tag{9}$$

Como $2 = \sqrt{2}\sqrt{2}$, entonces

$$\begin{aligned}
P &= V_{dc}I_{dc} + \frac{V_m I_m}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \\
&= V_{dc}I_{dc} + V_{rms}I_{rms}
\end{aligned} \tag{10}$$

Cuando la señal de corriente tiene componente continua el valor rms de la forma de onda está dado por

$$I_{rms} = \sqrt{I_{DC}^2 + I_{1rms}^2 + I_{2rms}^2 + \dots + I_{n rms}^2} \tag{11}$$

Donde I_{DC} , es la componente continua de la señal, I_{1rms} es el primer armónico de la señal, $I_{n rms}$ es el n -ésimo armónico de la señal.

IV. EL AMPLIFICADOR CLASE A

En operación clase A, el amplificador reproduce toda la señal de entrada, la corriente de colector es distinta de cero todo el tiempo, lo cual se considera muy ineficiente, ya que para señal cero en la entrada, se tiene un $I_{CQ} > 0$, luego el transistor disipa potencia.

A. Amplificador Emisor común

Sea la configuración de emisor común de la Fig. 1, la cual funciona en clase A. Por simplicidad se hace la resistencia de emisor $R_E = 0$. El primer paso será seleccionar R_L para máxima potencia de salida.

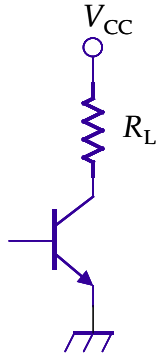


Fig. 1. Seguidor de emisor.

En la Fig. 2, se muestra las rectas de carga para dos puntos Q del amplificador, las cuales se intersectan con la curva P_{CE} . Se observa que I_{C2} será la máxima corriente permitida para i_C y V_{CE1} será el máximo voltaje permitido

para v_{CE} , para el transistor en cuestión. El óptimo elegido será el punto de reposo Q_1 , debido a que $I_{C1} < I_{C2}$, lo cual implica una disminución en la corriente de colector, lo que trae consigo una disminución en la distorsión y una menor corriente de base requerida para obtener I_{C1} .

Para que la realización sea factible, V_{CE1} debe ser menor que V_{CEO} , así se tomará que $V_{CE1} = V_{CC}$. Lo cual puede no ser necesariamente efectivo para otras configuraciones en clase A.

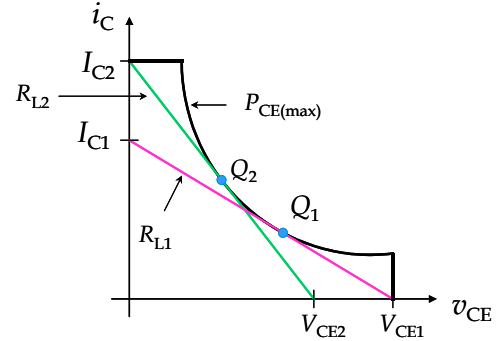


Fig. 2. Distintos puntos Q .

Para valores I_{CMax} y V_{CEMax} , se tiene que el punto Q estará dado por la tangente a la curva P_{CEMax} , dado por las coordenadas $I_{CQ} = \frac{I_{CMax}}{2}$ y $V_{CEQ} = \frac{V_{CEMax}}{2}$ como se indica en la Fig. . Se asume que la señal de entrada puede manejar el transistor entre el corte y la saturación, de esta forma para una variación en la corriente de base, se tiene la variación en la corriente de colector, y una variación en la potencia.

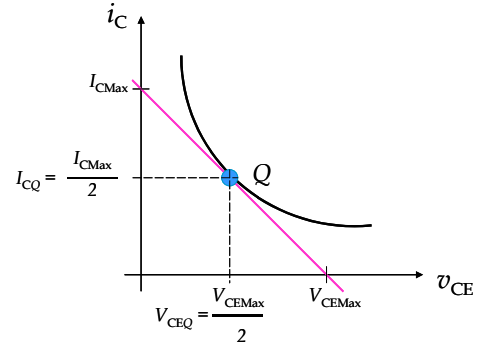


Fig. 3. Pto. Q para máxima excursión simétrica.

De acuerdo a la curva, se pueden establecer las curvas para i_C , v_{CE} , P_{CC} , P_{CE} y P_L .

El valor de la onda de potencia instantánea p_{CC} , estará dada por el producto $V_{CC}i_C$ y tiene la misma forma que i_C . $P_{CE} = i_C v_{CE}$. Note que la forma de onda de P_{CE} tiene una frecuencia el doble de las otras formas de onda.

La potencia en la carga será

$$P_L = I_{Crms}^2 R_L \tag{12}$$

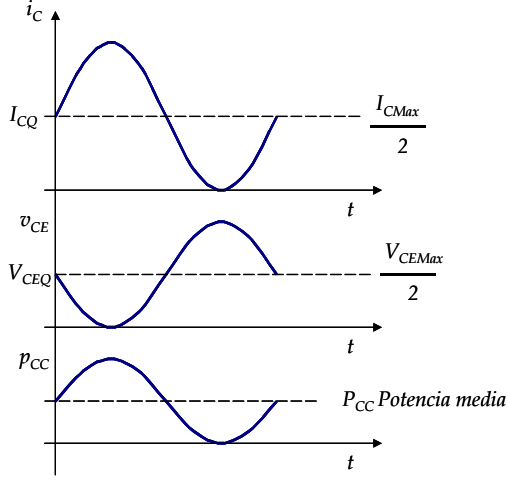


Fig. 4. Curvas.

Luego de acuerdo a (11), considerando que la corriente tiene componente continua y alterna, se tiene

$$P_L = \left[\sqrt{I_{CQ}^2 + \left(\frac{I_{Cmax}}{2\sqrt{2}} \right)^2} \right]^2 R_L = I_{CQ}^2 R_L + \frac{I_{Cmax}^2}{8} R_L \quad (13)$$

De la curva de la Fig. 3, se determina $I_{CQ} = \frac{I_{Cmax}}{2} = \frac{V_{CEMax}}{2R_L} = \frac{V_{CC}}{2R_L}$, luego

$$P_L = \frac{V_{CC}^2}{4R_L} + \frac{V_{CC}^2}{8R_L} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L} = P_{L(CC)} + P_{L(AC)} \quad (14)$$

Por otro lado, la potencia promedio entregada por la fuente será

$$P_{CC} = V_{CC} I_{CQ} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \quad (15)$$

Finalmente, la eficiencia estará dada por

$$\eta = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{2R_L}} = 0.25 \quad (16)$$

La eficiencia de este amplificador es baja, 25%, esto debido principalmente a que se mantiene una corriente de reposo en la carga, la cual no es usada (desperdiciada).

Como la potencia en el transistor corresponde a la potencia de la fuente menos la potencia en la carga (total, es decir la ca y la dc), se tiene que

$$P_{CE} = P_{CC} - P_L = \frac{V_{CC}^2}{4R_L} - \frac{V_{CC}^2}{8R_L} \quad (17)$$

El cual tiene dos componentes, el primero será cc y le segundo ac. Se define adicionalmente un Factor de Merito (FM)

$$\frac{1}{FM} = \frac{P_{L(AC)}}{P_{CE(DC)}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{4R_L}} = \frac{1}{2}$$

B. Configuración emisor común con transformador de acoplo

Sea el circuito de la Fig. 5a. Una forma de mejorar la eficiencia del amplificador clase A es usar el acoplo de la carga mediante un transformador. ¿Cómo es eso?

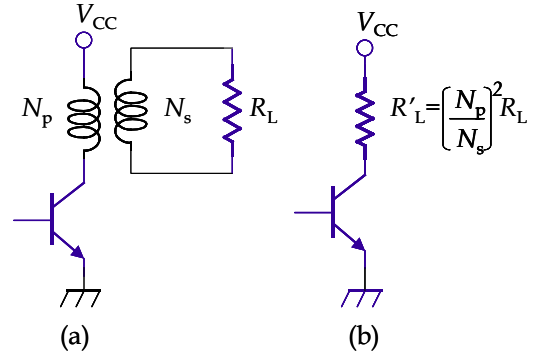


Fig. 5.

Al considerar este acoplamiento, hace que la recta de carga en cc pase por $V_{CEQ} = V_{CC}$, pues $R_{CC} = 0$, luego la recta de carga de alterna corta el eje del voltaje en un valor $2V_{CC}$. Como consecuencia de esto, cuando no hay señal, no existirá corriente por el colector.

La carga vista por el colector será

$$R'_L = \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 R_L = n^2 R_L \quad (18)$$

Para este caso la potencia en la carga será

$$P_L = I_{C_{rms}}^2 R'_L \quad (19)$$

Como sólo la carga recibe componente alterna, la corriente efectiva será la amplitud sobre $\sqrt{2}$, luego

$$P_L = \left(\frac{I_{Cmax}}{2\sqrt{2}} \right)^2 R'_L \quad (20)$$

$$P_L = \left(\frac{I_{CQ}}{\sqrt{2}} \right)^2 R'_L \quad (21)$$

Debido a que $V_{CEQ} = V_{CC}$, se tiene que $V_{CEMax} = 2V_{CC}$, por lo tanto, de la curva se determina que $I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{R'_L}$, así

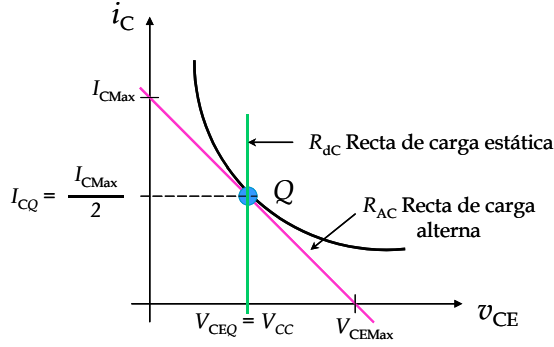


Fig. 6.

$$P_L = P_{L(AC)} = \frac{V_{CC}^2}{2R'_L} \quad (22)$$

Dado que la potencia media de la fuente es $P_{CC} = V_{CC}I_{CQ}$, entonces

$$P_{CC} = V_{CC} \frac{I_{CMax}}{2} = V_{CC} \frac{V_{CEMax}}{2R'_L} \quad (23)$$

$$= \frac{V_{CC}^2}{R'_L} \quad (24)$$

Finalmente, la eficiencia de la conversión será

$$\eta = \frac{P_{L(AC)}}{P_{CC}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R'_L}}{\frac{V_{CC}^2}{R'_L}} = 0.5$$

Por otro lado se tiene

$$P_{CE} = \frac{V_{CC}^2}{R'_L} - \frac{V_{CC}^2}{2R'_L} \quad (25)$$

$$(26)$$

Y el Factor de Merito

$$\frac{1}{FM} = \frac{P_{L(AC)}}{P_{CE(DC)}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R'_L}}{\frac{V_{CC}^2}{R'_L}} = \frac{1}{2}$$

Example 1: Sea el amplificador clase A de la Fig.7, sabiendo que a la carga R_L se le entrega una potencia de 2W calcular

- La potencia de la fuente P_{CC}
- I_{CQ} para que el transistor trabaje en clase A
- Características del transistor

Dado que el rendimiento es el 50%, se tiene

$$0.5 = \frac{P_{L(AC)}}{P_{CC}} = \frac{2W}{P_{CC}}$$

$$P_{CC} = 4W$$

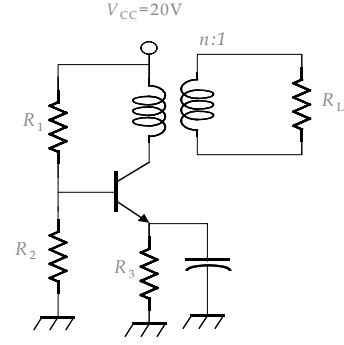


Fig. 7. Amplificador Clase A.

Como $P_{L(AC)} = \frac{V_{CC}^2}{R'_L} = 2W$, esto implica que $R'_L = \frac{20^2}{2W} = 100 [\Omega]$, además, $P_L = \left(\frac{I_{CQ}}{\sqrt{2}}\right)^2 R'_L$, entonces

$$2W = \frac{I_{CQ}^2}{2} 100 [\Omega]$$

$$I_{CQ} = 0.2 [A]$$

V. EL AMPLIFICADOR CLASE B

En esta operación, se usa un transistor para amplificar el ciclo positivo de la señal de entrada, mientras un segundo dispositivo se preocupa del ciclo negativo. Esta es la configuración push-pull.

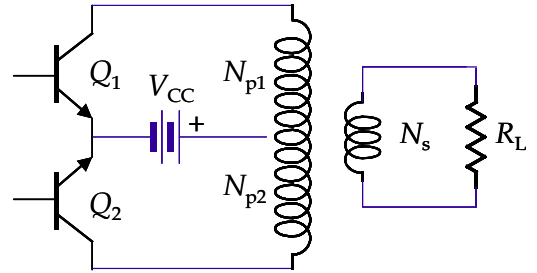


Fig. 8. Amplificador Clase B.

Se requieren dos transistores para producir la onda completa. Cada transistor se polariza en el punto de corte en lugar del punto medio del intervalo de operación.

La corriente de colector es cero cuando la señal de entrada es cero, por lo tanto el transistor no disipa potencia en reposo.

De la curva dada en la Fig. 9, se obtiene

$$I_{CMax} = \frac{V_{CEMax}}{R'_L} = \frac{V_{CC}}{R'_L}$$

Luego, la potencia en la carga será nuevamente la indicada en (12). En este caso, cada transistor opera durante un semi-ciclo, por lo tanto, el valor efectivo de la onda será $\frac{I_{CMax}}{2}$, así, la potencia total en la carga por cada transistor será

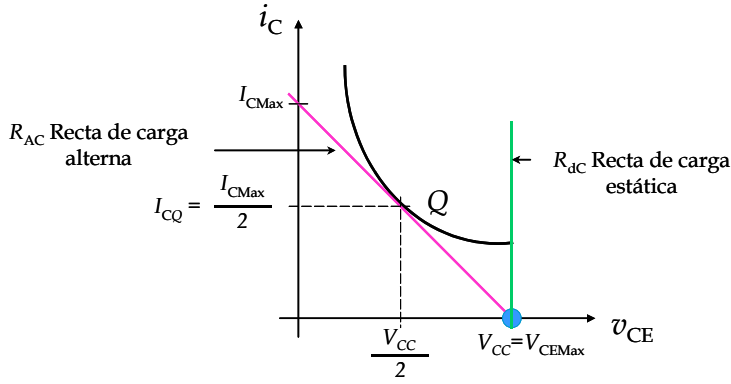


Fig. 9.

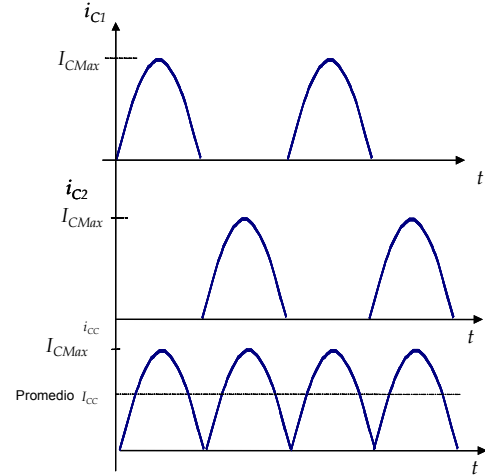


Fig. 10. Curvas de corriente.

$$P_L = \left(\frac{I_{CMax}}{2} \right)^2 R'_L = \left(\frac{V_{CC}}{2R'_L} \right)^2 R'_L$$

$$= \frac{V_{CC}^2}{4R'_L}$$

Luego, la potencia total en la carga suministrada por ambos transistores

$$P_{L(AC)} = \frac{V_{CC}^2}{2R'_L}$$

Para determinar la potencia promedio P_{CC} , entregada por V_{CC} , se debe determinar la corriente media consumida, la cual se llamará I_{CC} , (que corresponde a la media de la corriente i_{CC}). De acuerdo a la Fig. 10 la onda de corriente producida será la superposición de los dos semiciclos.

$$I_{CC} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_{CMax} \sin(\omega t) d\omega t$$

$$= \frac{I_{CMax}}{\pi} \int_0^\pi \sin(\omega t) d\omega t = \frac{I_{CMax}}{\pi} 2$$

$$= \frac{2I_{CMax}}{\pi}$$

Así se tiene que

$$P_{CC} = V_{CC} \frac{2I_{CMax}}{\pi} = V_{CC} \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}}{R'_L}$$

$$= \frac{2V_{CC}^2}{\pi R'_L} = 0.636 \frac{V_{CC}^2}{R'_L}$$

Finalmente, se tiene el rendimiento

$$\eta = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R'_L}}{\frac{2V_{CC}^2}{\pi R'_L}} = \frac{\pi}{4} = 0.785$$

Lo que corresponde a un 78.5% de eficiencia en la conversión. Por otro lado, la potencia disipada en el colector será

$$P_{CE} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R'_L}$$

Sea el circuito de la Fig. 11 que corresponde a un amplificador de *simetría complementaria*. La carga será de acoplamiento directo

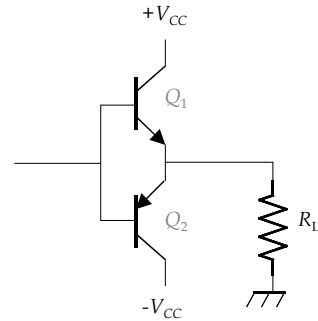


Fig. 11. Simetría complementaria.

Para este amplificador se tiene

$$P_L = I_{rms}^2 R_L = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = P_{L(AC)}$$

$$P_{CC} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi R_L}$$

$$\eta = \frac{\pi}{4}$$

$$P_{CE} = 2 \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L} - \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$

Simetría complementaria con acoplamiento capacitivo

Para este caso se tiene que la alimentación de cada transistor es $\frac{V_{CC}}{2}$ y la carga será R_L .

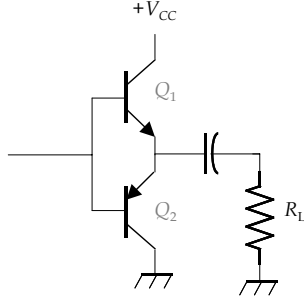


Fig. 12. Amplificador de simetría complementaria.

$$P_{CC} = \frac{V_{CC}^2}{\pi 2 R_L}$$

$$P_L = \frac{V_{CC}^2}{8 R_L}$$

$$P_{CE} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 4 R_L}$$

Example 2: Sea el amplificador clase B de la Fig.13. Considere una carga de $8 [\Omega]$. Calcule la potencia de señal máxima en la carga, la disipación correspondiente a cada transistor y la eficiencia.

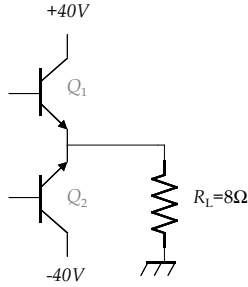


Fig. 13. Amplificador Clase B.

Como la potencia esta dada por

$$P_{L(AC)} = \frac{V_{CC}^2}{2 R_L} = \frac{(40)^2}{2 \cdot 8} = 100W$$

$$P_{CE} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi R_L} - \frac{V_{CC}^2}{4 R_L} = \frac{2 \cdot 40^2}{\pi 8} - \frac{40^2}{2 \cdot 8} = 27.3W$$

$$\eta = \frac{\pi}{4}$$

VI. CONCLUSIONES

Los amplificadores de potencia son fundamentales para diversas aplicaciones, tales como audio radio frecuencia. Solo se han mostrado algunos conceptos básicos, con el fin de entender las magnitudes más importantes, tales como la eficiencia, Potencia de señal y potencia disipada por el transistor.