

CAPÍTULO III

Análisis de pequeña señal de circuitos amplificadores

Parámetros característicos de los dispositivos amplificadores

En los dispositivos reales, la característica estática de transferencia no es lineal. La forma de la curva dependerá del dispositivo particular que se trate, la que corresponderá a una **ecuación de transferencia** distinta para cada caso, la que, además, dependerá de la tensión continua entre los terminales de salida, por lo que en un dispositivo determinado se tendrá una familia de curvas de transferencia con V_{OQ} como parámetro. Las características de entrada y salida tampoco resultan lineales. La ecuación (1.1), en consecuencia, no será válida.

Si se trabaja con una señal incremental senoidal de frecuencia tal que se puede admitir que todos los efectos reactivos son despreciables, a la que denominaremos en general señal alterna, que se suma a una continua de polarización, apareciendo en los gráficos como superpuesta a ella, se recorrerá una zona de una de las características de transferencia, si se admite que la tensión entre los terminales de salida se mantiene constante, alrededor del punto de reposo.⁽¹⁾

Para realizar un primer estudio simplificado, se admitirá que la tensión entre los terminales de salida, no tiene influencia sobre la corriente de salida del dispositivo, lo que equivale a aceptar que la característica de transferencia es única. Desarrollando en serie de Taylor alrededor del punto de trabajo se tendrá:

$$i_o = I_{OQ} + k_1(v_I - V_{IQ}) + k_2(v_I - V_{IQ})^2 + k_3(v_I - V_{IQ})^3 + \dots \quad (3.1)$$

Siendo: $i_o - I_{OQ} = i_o$: componente alterna de i_o

$v_I - V_{IQ} = v_i$: componente alterna de v_I

O sea:

$$i_o = k_1 v_i + k_2 v_i^2 + k_3 v_i^3 + \dots \quad (3.2)$$

Si la amplitud de la componente de señal es suficientemente pequeña, pueden despreciarse los términos de orden superior al primero en el desarrollo en serie, resultando:

⁽¹⁾ Se hablará de señal alterna "superpuesta" a una continua cuando nos referimos a incrementos en función del tiempo del valor que denominamos "continua". Este último pasa a ser un valor de referencia alrededor del que varía la señal aplicada, dando lugar a un **valor total** función del tiempo, tal como se definió en las ecuaciones (2.5) y (2.6) del capítulo II. Evidentemente en este caso no es aplicable el **Principio de superposición** por más que se acostumbra a referirnos normalmente a una señal "superpuesta" a una continua. Para que el dispositivo pueda comportarse como **activo** a los efectos de la señal, debe ser previamente polarizado de modo conveniente, por lo que el orden de aplicación de la continua y la alterna no es intercambiable. De cumplirse la expresión (3.3) se tendrá **linealidad** solo para la señal alterna pero no para los valores totales de tensiones y corrientes.

$$i_o \cong k_1 v_i \quad (3.3)$$

donde $k_1 = \left. \frac{di_o}{dv_i} \right|_Q$ tendrá dimensiones de conductancia

Por relacionar una variable de salida con una de entrada, k_1 será una **conductancia mutua o transconductancia**. Su valor dependerá del punto de reposo considerado y, al ser independiente de la componente de alterna, deberá considerarse como un constante para ella. Denominaremos g_m a la transconductancia para señales alternas superpuestas a una componente continua y obtenida para un determinado punto de reposo Q , aceptando que para la señal el dispositivo se comporta linealmente.

$$i_o = g_m v_i \quad (3.4)$$

La **transconductancia g_m definida para un punto de reposo Q** no corresponde a la definida en la ecuación (1.1), ya que aquella pertenecía a un dispositivo con característica de transferencia lineal. Solamente en aquel caso se tendrá que, para la señal alterna será $g_m = G_m = \text{cte.}$, para cualquier punto de reposo. Realizando el mismo procedimiento con la característica de entrada $i_i = f(v_i)$, admitiendo también que la tensión continua de polarización entre los terminales de salida, no tiene influencia sobre la corriente de entrada del dispositivo, podrá obtenerse una aproximación lineal de la relación entre las componentes alternas de tensión y corriente de entrada en los casos que corresponda

Siguiendo con la suposición de que los efectos reactivos son despreciables, se tendrá (con $r_i = 1/g_i$):

$$i_i = g_i * v_i \quad (3.5)$$

$$v_i = r_i * i_i \quad (3.6)$$

De este modo, a los efectos de la señal alterna, el dispositivo puede representarse mediante un modelo lineal que cumple dos condiciones – Fig. 3.1 –:

- Presenta una resistencia r_i a los efectos de la fuente de señal de excitación.
- Hace circular una corriente de señal i_o , controlada por v_i , por la resistencia de carga.

La resistencia r_i se denomina **resistencia de entrada** del dispositivo y $g_m v_i$ es un **generador controlado de corriente a los efectos de la resistencia de carga**.

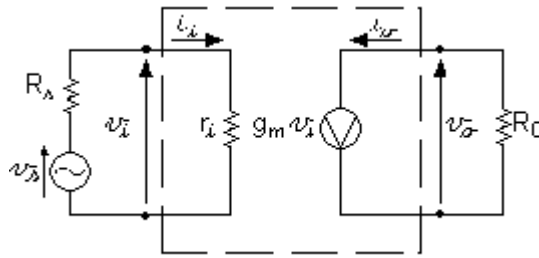


Fig. 3.1

Este *generador controlado* es el que representa en el *modelo de pequeña señal* o *modelo incremental* del dispositivo amplificador el efecto, analizado en el capítulo II, de tomar potencia de continua de la fuente de alimentación continua del amplificador y entregarla a la carga como potencia de señal útil controlada por la señal de excitación aplicada a la entrada del amplificador, que se desea procesar con éste.

Normalmente, el dispositivo real no se comporta a la salida como un generador ideal de corriente y, en consecuencia, deberá incluirse en el modelo la resistencia equivalente de Norton de ese generador, que denominaremos **resistencia de salida** del dispositivo e indicaremos con r_o –Fig.3.2–.

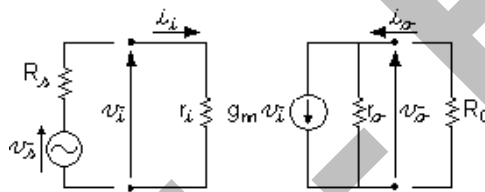


Fig. 3.2

La existencia de esta resistencia, que incluye la dependencia de la característica de transferencia con la tensión entre los terminales de salida, exige modificar la definición de la transconductancia ya que parte de la corriente $g_m v_i$ que entrega el generador controlado de corriente, circula a través de r_o . Por ello se definirá al **parámetro transconductancia** como:

$$g_m = \left. \frac{i_o}{v_i} \right|_{v_o=0} \quad (3.7)$$

con la salida en cortocircuito, de modo que resulte **independiente de la carga**.

Además, la mayoría de los dispositivos reales tienen solamente tres terminales y, por lo tanto, uno de los terminales resultará común al par de terminales de entrada y al par de terminales de salida.

En la Fig. 3.3 también se ha incluido un efecto que no se ha considerado hasta ahora en este estudio introductorio pues se ha supuesto que la señal de salida no afecta a la tensión o corriente de entrada,

considerando que se trabaja con un **dispositivo perfectamente unilateral**.

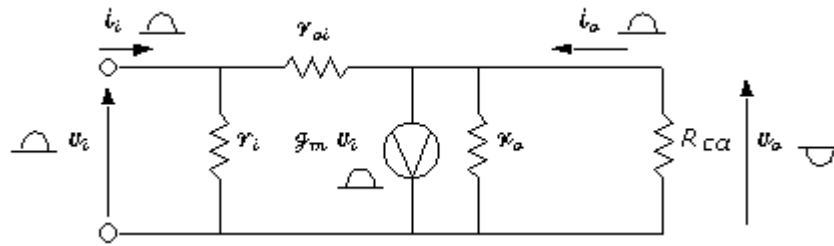


Fig. 3.3

Los dispositivos reales no cumplen exactamente con esta condición aunque en gran parte de las aplicaciones se aproximan suficientemente a ella. Sin embargo en determinadas configuraciones debe tenerse en cuenta la incidencia de la resistencia de carga sobre el generador de señal aplicado entre los bornes de entrada.

De poder despreciarse este efecto, la resistencia de entrada es la r_i ya definida, que es un **parámetro propio del dispositivo** para la señal.

Si la resistencia vista por el generador de señal depende del dispositivo y de su resistencia de carga para señal, debemos diferenciar la nomenclatura de lo que denominamos resistencia de entrada. Utilizaremos la notación R_i para indicar la resistencia de entrada que el **circuito total** presenta al generador de excitación, para diferenciarla del parámetro r_i que es función exclusiva del dispositivo.

El efecto de la salida sobre la entrada, que se hace sentir en los dispositivos prácticos, cuya importancia depende de la configuración en que se los usa, se denomina **realimentación**, y generalmente se incluye este efecto en el modelo del dispositivo introduciendo una resistencia r_{oi} conectada entre la entrada y la salida.

Como se dijo, en muchos casos en los dispositivos prácticos, la resistencia r_{oi} es muy elevada y por lo tanto en ellos puede despreciarse, a los efectos de parte o todos los cálculos que se deban realizar. Dado ese valor relativamente elevado de r_{oi} , se mantiene la definición de g_m de (3.7), admitiendo que por el cortocircuito circula sólo la corriente que impone el generador controlado sin considerar la corriente proveniente desde el generador de entrada a través de r_{oi} .

En los dispositivos prácticos, normalmente puede considerarse que la resistencia r_{oi} es suficientemente elevada como para que la corriente proveniente de la entrada a través de ella, sea despreciable frente a la del generador controlado, pudiéndose calcular g_m de acuerdo a la definición dada por (3.7).

El **modelo circuital incremental o de pequeña señal del dispositivo**, queda como se muestra en la Fig. 3.3, donde se conectó además, externamente, la resistencia de carga de señal [$R_{ca} = R_C // R_L$] para mejor comprensión. Se pone en evidencia que para definir r_i habrá que hacerlo mediante una consideración similar a la realizada para g_m , es decir, considerando la salida en cortocircuito para eliminar la influencia de R_C .

Aún con esta consideración, mediante la relación definida como $v_i/i_i|_{v_o=0}$ se obtendrá una resistencia ($r_i//r_{oi}$). En muchas aplicaciones este paralelo resultará prácticamente igual a r_i por tener valores tales que $r_{oi} \gg r_i$.

3.1.- Signo del generador de corriente

En la Fig. 3.3 se ha representado el modelo incremental del dispositivo (parámetros del modelo indicados con letra minúscula y subíndices en minúscula), y la influencia la resistencia de carga de continua R_C se ha incluido junto a la resistencia de carga donde se desea obtener la potencia de señal de salida útil, R_L , en una resistencia de carga para la señal del dispositivo, que denominaremos R_{ca} :

$$R_{ca} = R_C // R_L \quad (3.8)$$

Se supone que se excita al circuito con una **señal alterna senoidal** v_i que proviene de un generador de prueba, que se considera ideal, y por lo tanto se ha excluido la influencia de la resistencia de polarización de la entrada del dispositivo que queda en paralelo con dicho generador, tomándose como corriente de entrada i_i la que circula directamente por los terminales de entrada del dispositivo activo.

Se han colocado los **sentidos de referencia** de las cuatro variables de los dos pares de terminales, tomando para las corrientes, el sentido de referencia positivo entrante por los terminales no comunes y para las tensiones, el sentido de referencia positivo se considera la de los terminales no comunes respecto al terminal común.

De este modo, **para** los sentidos que se han tomado como referencia, **las corrientes serán positivas** en el **semiciclo en que circulan en el sentido indicado por la flecha** y negativas en el otro semiciclo, en tanto que **las tensiones serán positivas** en el **semiciclo en que es positivo el terminal no común respecto al común** y negativas en el otro semiciclo.

Si para la configuración del dispositivo activo en estudio, el generador controlado tiene el sentido indicado en la Fig. 3.3 con g_m positivo, el análisis de los signos que toman las señales en un dado semiciclo, se podrá realizar del siguiente modo:

Se parte del semiciclo positivo de v_i ($v_i > 0$). Como el dispositivo a la entrada es pasivo para la señal proveniente del generador de excitación, con los **sentidos de referencia adoptados** i_i estará en su semiciclo positivo ($i_i > 0$). Al ser el semiciclo de partida para el análisis $v_i > 0$, el generador controlado $g_m v_i$ será positivo, es decir producirá una corriente entrante por el terminal no común de salida resultando, **de acuerdo a los sentidos de referencia adoptados** $i_o > 0$.

Si $i_o > 0$, será $v_o < 0$, es decir v_o estará en su semiciclo negativo con lo que, **de acuerdo a las referencias adoptadas** para las tensiones terminales existirá una inversión de fase en la tensión de salida respecto a la tensión entrada.

En el semiciclo en que la tensión de entrada sea negativa, $v_i < 0$, i_i también estará en su semiciclo negativo, $i_i < 0$, lo mismo que el generador controlado, $g_m v_i < 0$, por lo que la corriente que entregará este generador será saliente por el terminal "2". En este caso la tensión de salida estará en su semiciclo positivo, $v_o > 0$, manteniéndose la inversión en fase de la señal de salida respecto a la de entrada. Las expresiones analíticas de las señales a la entrada y la salida serán:

$$v_i = \hat{V}_i \sin \omega t \quad \text{y} \quad v_o = \hat{V}_o \sin (\omega t + \pi) = -\hat{V}_o \sin \omega t$$

considerando la senoide de entrada como referencia de fase (origen de fase o $\phi_i=0$).

Si el generador controlado $g_m v_i$ fuese saliente por el terminal "2" con $g_m > 0$, en el semiciclo positivo de v_i , la corriente de salida estará en su semiciclo negativo, **de acuerdo al sentido de referencia adoptado**, y por lo tanto, la tensión de salida estará en su semiciclo positivo. O sea, no existirá inversión de fase entre la tensión de entrada y salida.

3.2.- Parámetros característicos del circuito amplificador

En base a las consideraciones realizadas, **se deberá distinguir** entre los **parámetros propios del dispositivo** que integran su modelo de comportamiento circuital para la señal, independientes de los elementos del circuito externo, y los **parámetros del circuito completo**, que incluyen los efectos del dispositivo y de los elementos conectados externamente al mismo para la señal alterna. ⁽²⁾

Un dispositivo activo genérico, puede analizarse a los efectos de la señal, como **una red circuital lineal de dos pares de terminales** – Fig. 3.4. -, al que se conectan los elementos del circuito externo que tienen efectos directos sobre la señal alterna.

⁽²⁾ Debe tenerse en cuenta que las continuas de polarización se incluyen implícitamente en los valores de los parámetros propios del dispositivo, pues ellos dependen del punto Q por ser éste a lineal.

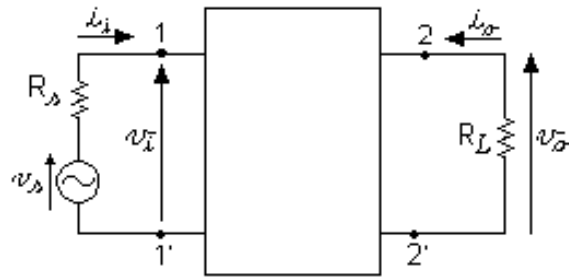


Fig. 3.4

Sin embargo el dispositivo, estará normalmente acompañado por los componentes circuitales necesarios para su polarización en continua, a fin de hacerlo trabajar en un punto de reposo Q dado – Fig. 3.5 -.

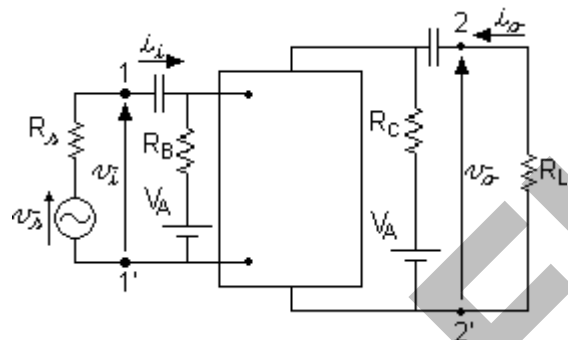


Fig. 3.5

Evidentemente, los componentes circuitales de continua influyen sobre los parámetros de alterna del circuito. Por lo tanto, al estudiar el comportamiento del sistema para la señal alterna mediante la red bi-puerta de la Fig. 3.4, se incluyen dentro de la caja negra todos los elementos y resistores que forman parte de los circuitos de continua e influyen en el comportamiento del sistema para la señal alterna, considerando que las fuentes de continua y los capacitores de acoplamiento se comportan como cortocircuitos para la señal.

En estas condiciones se pueden definir una serie de **parámetros característicos del circuito amplificador**, que dependerán de los parámetros propios del dispositivo y de los elementos externos que inciden en el funcionamiento con señal, como ser los resistores R_C y R_B de los circuitos de continua y las resistencias de carga R_L e interna del generador de excitación R_s . Se tienen así cuatro variables terminales para la señal:

v_i : tensión de entrada	i_i : corriente de entrada
v_o : tensión de salida	i_o : corriente de salida.

Entre estas cuatro variables, pueden establecerse diversas relaciones que llamaremos **parámetros característicos del circuito amplificador**. Dichos parámetros serán números reales o complejos según haya o no efectos reactivos en el sistema.

Para señales alternas de amplitud suficientemente pequeña, el circuito amplificador podrá considerarse como una red circuital lineal de dos pares de terminales.

Definimos **red lineal** como el sistema al cual se le puede aplicar el **principio de superposición de efectos**. A partir de esta definición se puede deducir que las variables de un sistema lineal estarán relacionadas por funciones que permitan la aplicación de dicho principio, es decir, **funciones lineales**. Para que una función cumpla la condición de ser lineal, fundamentalmente deberá ser **distributiva respecto a la suma algebraica**. Dichas funciones serán:

Producto por una constante k

Integración $\int dt$

Derivación $\frac{d}{dt}$

Por lo tanto, los sistemas lineales serán sistemas tales que la relación entre dos variables cualesquiera, esté dada por una de estas tres funciones. Los ejemplos típicos en circuitería son las relaciones entre tensión y corriente en una resistencia, capacitancia o inductancia.

Por supuesto que, para que una R, C ó L sean lineales sólo la función que vincula la tensión entre terminales y la corriente que circula por él, deberá ser lineal.

Si además, el valor de la resistencia, capacidad o inductancia permanece invariante en el tiempo y con las amplitudes de la tensión y corriente en ellas, las ecuaciones serán con coeficientes constantes. Por lo tanto, el análisis de una red lineal, con la condición impuesta en el párrafo anterior, conducirá a ecuaciones diferenciales lineales a coeficientes constantes, con las que se podrá construir el modelo matemático en la mayoría de los circuitos prácticos.

Una red lineal conserva la función exponencial. Es decir, si una variable colocada a la entrada es exponencial, la variable de salida también lo será. Al ser la función senoidal una suma de exponenciales, **la única función periódica que conserva una red lineal será la función senoidal**. Por supuesto que cuando hablamos de conservación de la forma de onda nos referimos a que **se conserva la forma de variación en el tiempo de la onda**, aún cuando varíen la amplitud y haya corrimiento de fase.

Por **aplicación directa de Thévenin o Norton** puede establecerse un modelo circuital simple para reemplazar a la red de dos pares de terminales de la Fig. 3.4.

Este modelo equivalente obtenido a partir de aplicar Thévenin incluye los efectos del dispositivo y de los restantes componentes del circuito, por lo que proporciona información del comportamiento eléctrico del mismo para pequeña señal, **a los efectos del generador de excitación y de la carga.**

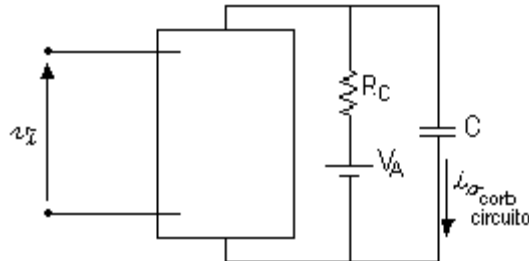


Fig. 3.6

Cuando se pretenda calcular parámetros del modelo incremental del circuito o del dispositivo con la salida en cortocircuito, para un punto de trabajo dado de este último, no puede cortocircuitarse directamente la salida, pues, en ese caso, el dispositivo quedaría sin polarizar.

Por este motivo deberá cortocircuitarse la salida únicamente para la alterna, lo que se logra colocando en paralelo con el circuito de polarización de continua, un capacitor de reactancia suficientemente pequeña frente a R_C de modo que toda la corriente alterna de salida circule por el capacitor -Fig. 3.6-. Es decir: $X_C \ll R_C$.

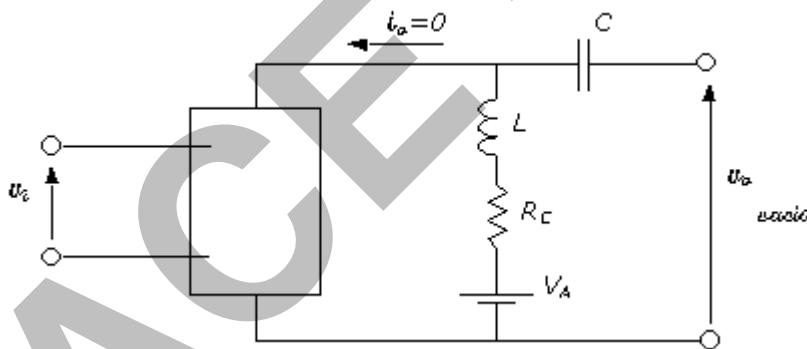


Fig. 3.7

Análogamente, si se desea medir la tensión a circuito abierto para la alterna, deberá colocarse en serie con el circuito de polarización de continua, un inductor de modo que presente una reactancia suficientemente grande frente a r_o de forma tal que no circule corriente alterna por R_C - Fig. 3.7 -. Es decir $X_L \gg r_o$.

En conclusión, los parámetros de alterna de un modelo como el de la Fig. 3.9, se podrán medir con la entrada o salida en **cortocircuito o abiertas para la señal**, pero **sin modificar la polarización de continua.**